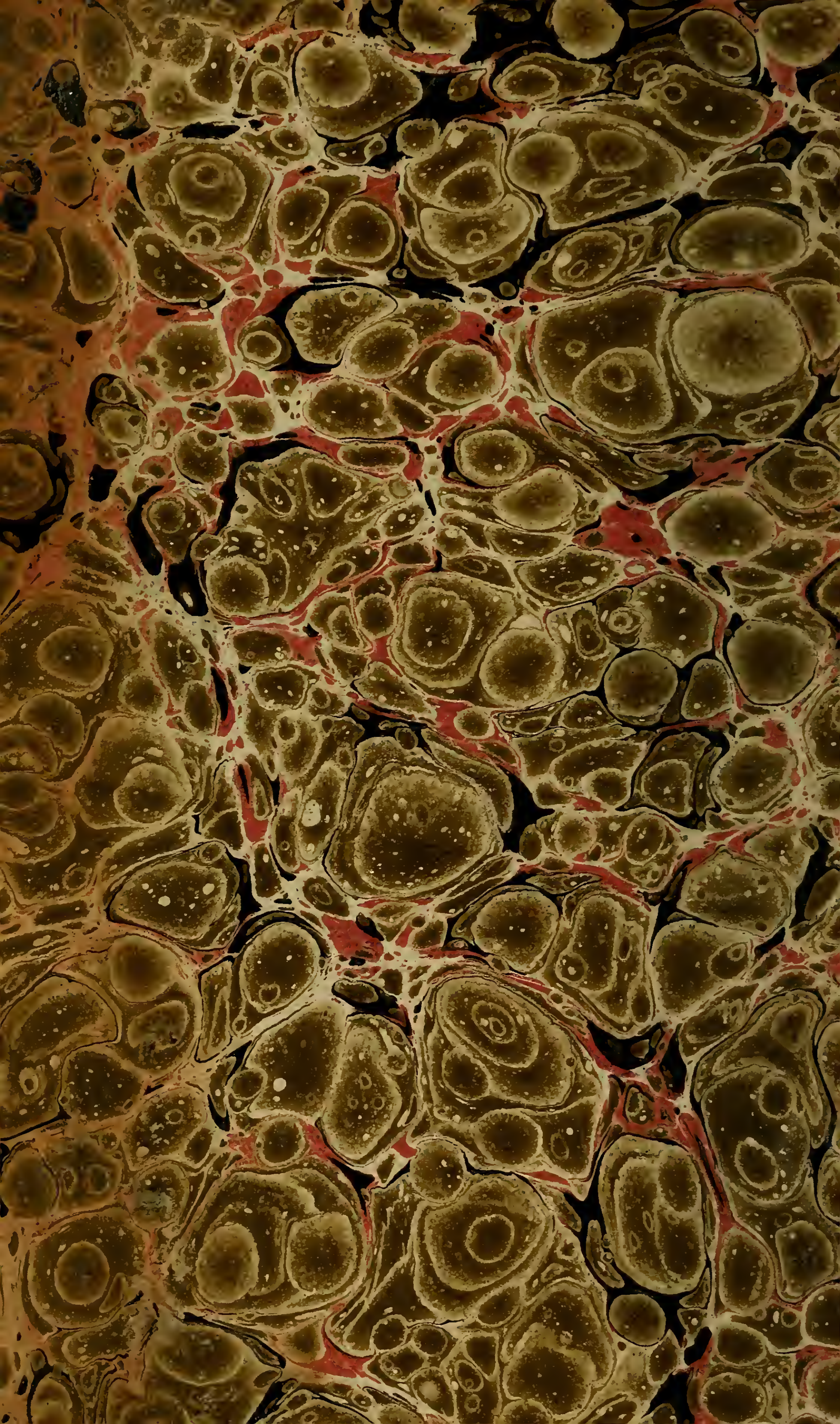
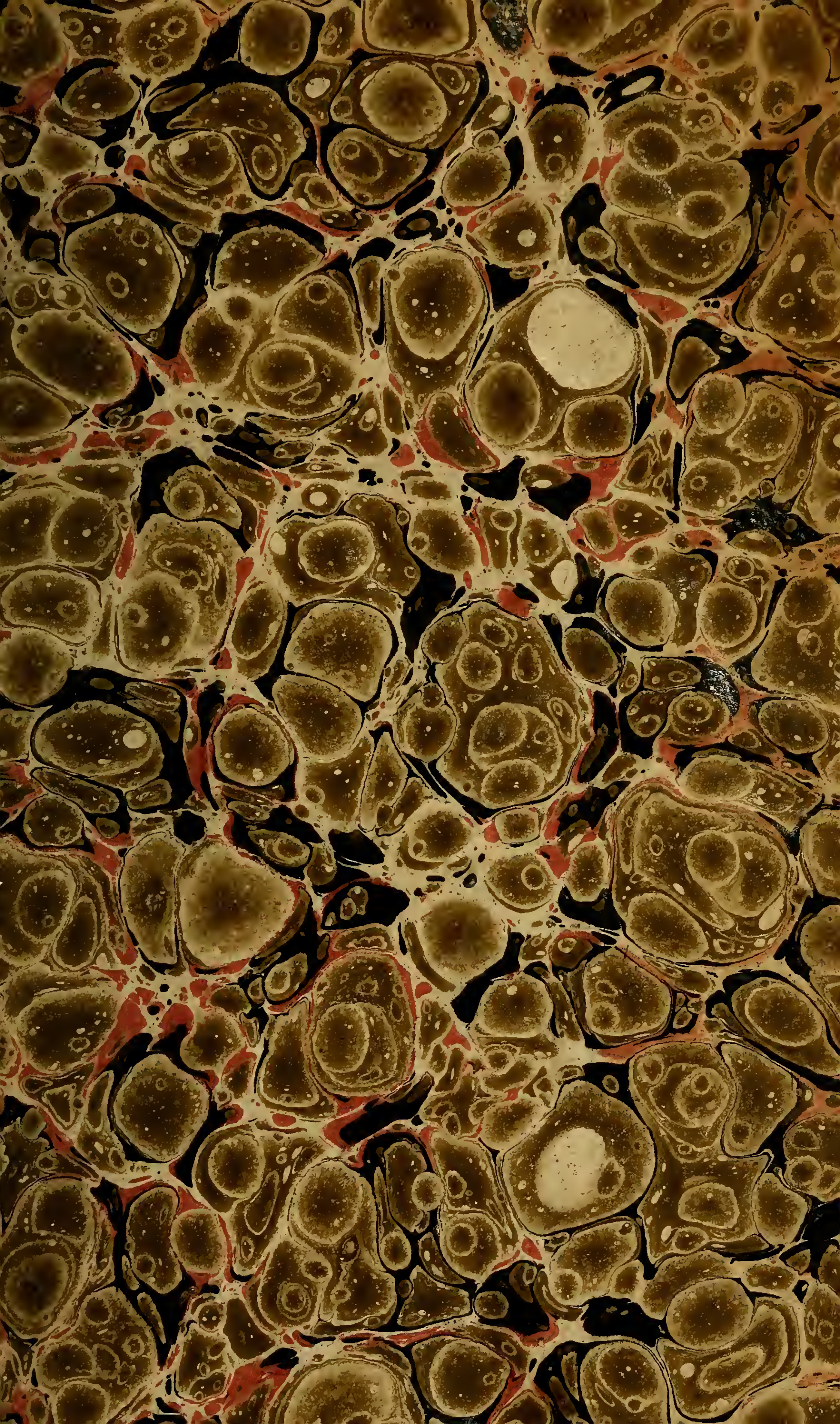

237





Collège de Strasbourg, 18[illegible]
1er Prix [illegible]

MANUEL D'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

IMPRIMERIE DE HUZARD-COURCIER,
rue du Jardinet, n° 12.

MANUEL D'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE,

OU

TRAITÉ sur l'action mutuelle des conducteurs électriques et des aimans, et sur une nouvelle théorie du magnétisme ; pour faire suite à tous les Traités de Physique élémentaire ;

PAR J.-F. DEMONFERRAND,

Ancien élève de l'École Polytechnique, Professeur agrégé de Physique et de Mathématiques au Collége royal de Versailles.

OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE, POUR LES BIBLIOTHÈQUES DES COLLÉGES ROYAUX.

PARIS,

BACHELIER, LIBRAIRE, SUCCESSEUR DE Mme Ve COURCIER,
Quai des Grands-Augustins, n° 55.

1823.

MANUEL
D'ÉLECTRICITÉ
DYNAMIQUE.

---

§ 1. M. Oersted, par sa belle découverte de l'action qu'exerce sur l'aiguille aimantée, une portion quelconque du circuit voltaïque, a appelé l'attention des physiciens sur les propriétés des conducteurs qui établissent la communication entre les deux extrémités d'une pile de Volta. M. Ampère a fait voir le premier que les diverses parties de ces conducteurs exerçaient les unes sur les autres des attractions et des répulsions entièrement distinctes, des attractions et des répulsions électriques ordinaires. Les travaux entrepris sür le même sujet, par plusieurs savans français et étrangers, ont fait connaître un grand nombre de faits nouveaux, qui sont décrits isolément dans plusieurs recueils scientifiques, et dont l'ensemble forme

maintenant une nouvelle branche de la Physique.

J'ai pensé qu'il serait utile de réunir en corps de doctrine ces observations éparses, et d'offrir dans un cadre étroit les expériences et les raisonnemens qui conduisent aux lois générales d'une classe de phénomènes importante, par les rapports intimes qu'elle établit entre deux agens impondérables, l'électricité et le magnétisme.

Je diviserai cet Essai en trois parties. Dans la première je parlerai de l'action mutuelle des conducteurs voltaïques ; dans la seconde de l'action de la terre sur ces mêmes conducteurs ; dans la troisième je traiterai de l'influence mutuelle des conducteurs voltaïques, et des aimans et de la nouvelle théorie du magnétisme. Pour ne pas sortir des bornes d'un ouvrage élémentaire, et conserver en même temps l'exactitude des preuves, je placerai dans un chapitre séparé les calculs nécessaires pour établir la loi mathématique des attractions et répulsions des conducteurs voltaïques, et les principales conséquences de la formule qui exprime cette loi.

PREMIÈRE PARTIE.

§ 2. L'ENSEMBLE des phénomènes électriques a conduit les physiciens à admettre que tous les corps pondérables contiennent dans leur état naturel, les principes des deux électricités dans un état de combinaison qui les neutralise. Le frottement, la pression, l'élévation de température, le contact des métaux hétérogènes, dégagent les deux électricités de leur combinaison, et rendent chacune d'elles sensible en la séparant de l'autre. Volta a donné le nom de *force électro-motrice*, au pouvoir dont jouissent certains agens de séparer les deux espèces d'électricités, le caractère général de cette force est de mettre toujours en évidence les deux électricités simultanément; ainsi, le frottoir et le corps frotté manifestent des électricités contraires, les deux extrémités d'une tourmaline sont dans des états électriques opposés, deux disques de métaux différens isolés et mis en contact, se chargent l'un d'électricité

positive, l'autre d'électricité négative ; dans tous les cas, les deux électricités se répandent chacune sur la surface des corps conducteurs, qui sont en communication avec les corps électrisés. Quand deux métaux, par exemple du zinc et du cuivre, exercent par leur contact une force électro-motrice, les électricités séparées se répandent sur les deux plaques, et sur les conducteurs en communication avec ces plaques, qui n'exercent eux-mêmes aucune force électro-motrice. Mais si une lame de zinc était en contact sur ces deux surfaces avec deux lames de cuivre, il n'y aurait point d'électricités décomposées dans le zinc ; car elles resteraient en équilibre entre les deux forces égales et contraires, exercées sur les deux faces opposées de la lame de zinc. Il n'est pas nécessaire pour que cet équilibre ait lieu, que les deux lames de cuivre soient égales; une lame de zinc soudée d'une part à une plaque de cuivre de même grandeur, et de l'autre à un simple fil du même métal, ne donne avec les plus forts condensateurs, aucun signe d'électricité ; ainsi, la grandeur de la surface sur laquelle le contact a lieu, ne paraît avoir aucune influence sensible sur l'intensité de la force électro-motrice. Mais si la plaque de zinc soudée avec une plaque de cuivre, est en communication sur son autre face avec une seconde plaque de cuivre, par l'intermédiaire de l'eau

acidulée ou d'une dissolution saline, l'expérience prouve que la seconde plaque de cuivre prend le même état électrique que la plaque de zinc, ce qui montre que deux métaux séparés par un conducteur liquide, n'exercent l'un sur l'autre aucune action électro-motrice. Si maintenant on soude une plaque de zinc à la seconde plaque de cuivre, la force électro-motrice s'exercera de nouveau entre ces deux métaux, et la plaque de zinc se trouvera chargée d'une quantité d'électricité, double de celle que l'on a observée dans la première plaque; en faisant ainsi communiquer plusieurs paires de disques de cuivre et de zinc soudés ensemble, on accumule l'effet de la force électro-motrice, et l'on obtient l'appareil si connu des physiciens et des chimistes, sous le nom de *pile de Volta*.

Lorsque la force électro-motrice est développée dans une pile voltaïque, l'électricité se manifeste par deux classes de phénomènes entièrement distinctes. La première s'observe lorsque les conducteurs, mis en communication avec les deux extrémités de la pile, sont séparés par quelque corps isolant. Alors chacun d'eux donne à l'électromètre des signes d'électricités, positive dans l'un, et négative dans l'autre. Si l'on en approche le doigt ou un autre conducteur, on en tire une étincelle, on peut en faire jaillir de même un très

grand nombre, et prolonger indéfiniment les mêmes effets tant que la pile est en action. L'électricité ainsi accumulée à chaque extrémité de la pile, jouit de toutes les propriétés de l'électricité que nous développons avec plus d'énergie par le frottement; ainsi chaque conducteur de l'appareil attire les corps qui sont électrisés différemment, et repousse ceux qui sont électrisés de la même manière. Dans cet état électrique que tous les physiciens nomment *tension*, l'électricité est en équilibre entre les forces qui tendent à la répandre au dehors des conducteurs, et la résistance des corps qui s'opposent à son passage.

Si l'on établit la communication entre les deux extrémités de la pile par un système de conducteurs non interrompu, alors le même équilibre ne peut plus exister; chaque espèce d'électricité continue à se porter librement à travers les conducteurs dans le sens où elle manifestait sa tension; les attractions et répulsions des corps légers, les influences électriques, etc., disparaissent et sont remplacées par de nouveaux phénomènes, tels que les décompositions chimiques, l'élévation de température, l'action continue sur les organes des animaux qui font partie du circuit, etc.

Pour distinguer ces deux classes de phénomènes, M. Ampère a proposé de donner le nom d'*électro-statiques*, à tous les effets produits par l'électricité

tenue en équilibre entre sa force expansive et la résistance des corps idio-électriques, et le nom d'*électro-dynamiques*, aux effets produits par l'électricité en mouvement dans un système continu de conducteurs.

Dans ce dernier cas, il est difficile d'admettre que les deux électricités positive et négative se meuvent simultanément dans le même conducteur, sans reformer du fluide neutre; il est beaucoup plus probable que le transport des deux électricités se fait par une série de décompositions et de recompositions successives; quelque opinion que l'on adopte à ce sujet, on pourra toujours donner le nom de *courant électrique* à cette disposition particulière d'électricité. L'expression de *courant électrique* est, comme on le voit, tirée des idées généralement adoptées sur les piles voltaïques, néanmoins lors même que des faits nouveaux renverseraient les théories admises, il n'en resterait pas moins constant que le conducteur qui réunit les deux extrémités d'une pile voltaïque, acquiert des propriétés particulières que l'on doit regarder comme des effets de l'électricité. Pour désigner d'une manière simple les diverses parties du conducteur et leurs positions respectives, nous prendrons pour la direction du courant celle de l'électricité positive, c'est-à-dire indépendamment de toute théorie sur la nature de l'électri-

cité, la direction du transport de l'hydrogène et des bases, lorsque de l'eau ou une substance saline fait partie du circuit.

§ 3. La direction du courant varie dans une pile suivant la manière dont elle est construite; en France on a coutume de la composer d'un certain nombre de paires de plaques de zinc et de cuivre, séparées par des auges ou des vases qui contiennent l'eau acidulée. Pour transporter l'influence électrique, on plonge dans les deux auges extrêmes, des rectangles de cuivre portant des fils de même métal, qui se trouvent ainsi en communication avec les deux plaques extrêmes, c'est-à-dire d'une part avec la première plaque de cuivre, de l'autre avec la dernière plaque de zinc. Mais alors il est évident que cette dernière plaque de zinc devient inutile, puisqu'elle se trouve en contact avec du cuivre sur ses deux faces opposées; on peut donc la supprimer et remplacer la dernière paire par une simple plaque ou demi-paire en cuivre, à laquelle on soudera le fil de cuivre qui sert de conducteur. On peut de même à l'autre extrémité, enlever la première plaque de cuivre et souder immédiatement le fil conducteur à la plaque de zinc, puisque l'étendue du contact est sans influence sur la quantité d'électricité développée; on pourra alors employer la plaque de cuivre et la plaque de zinc séparées de chaque

paire extrême, à produire un effet utile en les soudant ensemble pour former un élément de plus. Dans une pile de Volta, composée d'un nombre quelconque de paires de plaques de zinc et de cuivre soudées ensemble, et de deux demi-paires, l'une de zinc, l'autre de cuivre à chaque extrémité, la direction du courant est, dans les conducteurs de la demi-paire en cuivre à la demi-paire en zinc, et le circuit voltaïque se ferme dans la pile de la demi-paire en zinc à la demi-paire en cuivre. Le contraire a lieu dans une pile où tous les élémens sont complets. Le nom de *pôles* que l'on a souvent donné aux deux fils soudés aux deux extrémités de la pile, est très impropre et ne présente à l'esprit que de fausses analogies. En Géométrie on entend par pôles d'un cercle, deux points pris sur une ligne perpendiculaire au plan de ce cercle, et passant par son centre; la même signification se retrouve en Astronomie, car les pôles d'une planète ne sont autre chose que les pôles de son équateur; on a donné ensuite le même nom aux deux extrémités d'un aimant qui se dirigent vers les deux pôles de la terre; mais rien n'engage à l'appliquer aux extrémités d'une pile voltaïque, car alors il faudrait conserver la même dénomination pour tous les conducteurs; ainsi dans un conducteur circulaire, les deux pôles seraient les deux points d'entrée et de sortie du

courant, c'est-à-dire deux points pris sur ce cercle même, et très différent de ses pôles géométriques. Des significations aussi diverses données au même mot, ne pourraient que jeter de la confusion et de l'obscurité dans l'exposition des phénomènes. C'est pour obvier à cet inconvénient, que M. Ampère a proposé de donner le nom de *rhéophore* (porte-courant) aux deux portions de conducteurs soudées aux plaques extrêmes de la pile, et qui transportent où l'on veut l'électricité dynamique, par analogie avec le nom d'*électrophore* donné à l'instrument dont on se sert pour transporter l'électricité statique. J'adopterai cette dénomination dans tout ce qui va suivre, et j'appellerai *rhéophore positif*, celui qui donne des signes d'électricité positive ou vitrée, quand la communication n'est pas établie, et *rhéophore négatif* celui qui est à l'autre extrémité de la pile.

Je substitue les noms de *rhéophore positif* et de *rhéophore négatif* à ceux de *rhéophore cuivre* et *zinc*, parce qu'en désignant les extrémités de la pile par le métal qui s'y trouve, on tombe dans une grande confusion de langage ; en effet, nous avons vu que le courant a lieu du cuivre au zinc dans les conducteurs d'une pile terminée par deux demi-paires, et en sens contraire, dans les piles terminées par des paires complètes ; il en est ré-

sulté que M. Faraday et plusieurs auteurs anglais, ont appliqué les dénominations de cuivre et de zinc aux extrémités de la pile, d'une manière tout-à-fait opposée au sens qu'y attachent les auteurs français et allemands; il est donc important d'abandonner des dénominations qui pourraient donner lieu à de nombreuses méprises, et de désigner les extrémités de la pile par l'espèce d'électricité qui se manifeste dans chacune d'elles.

§ 4. Pour observer les mouvemens que les forces électro-dynamiques tendent à imprimer à un conducteur métallique, il faut qu'une partie de ce conducteur soit rendue très mobile sans que les communications soient interrompues. L'expérience a prouvé que le simple contact des fils de cuivre, ne suffisait pas pour établir une communication complète; mais on y parvient en terminant la partie mobile par deux pointes d'acier qui plongent dans deux coupes pleines de mercure; quand ces deux coupes sont placées dans une même verticale, il est nécessaire qu'une seule des pointes porte sur le fond de sa coupe, car si toutes deux appuyaient, la rotation autour de la verticale qui passe par le centre de l'appareil, ne serait plus libre aussitôt que les deux pointes ne seraient pas exactement dans cette même verticale, inconvénient qu'il serait impossible d'éviter dans la pratique. Il est bon de mettre

un plan de verre au fond des coupes pour diminuer le frottement des pointes d'acier.

L'appareil le plus simple pour répéter la plus grande partie des expériences, est représenté planche 1 ; il se compose de plusieurs systèmes de conducteurs fixes, indépendans les uns des autres, et de conducteurs mobiles, que l'on suspend successivement dans des coupes pleines de mercure. On se sert de coupes semblables pour assurer les communications entre les différens conducteurs, fixes ou mobiles, dont l'ensemble forme le circuit voltaïque. L'appareil est porté par une table en bois. Au milieu de la table s'élèvent les deux colonnes métalliques Txy et $T'x'y'$, qui portent plusieurs coupes, dont j'expliquerai l'usage et la disposition, en décrivant les expériences auxquelles elles se rapportent. La première colonne est entourée à son pied par une coupe circulaire Q, dans laquelle plonge une des extrémités d'un tourniquet métallique O, dont l'autre extrémité peut être placée à volonté dans une des huit coupes a,b,c,d,e,f,e',f'. La seconde colonne communique par une lame métallique avec la coupe r', munie d'une vis de pression, destinée à fixer l'un des rhéophores, par exemple, le rhéophore positif dans un grand nombre d'expériences. De la coupe r semblable à r', part une tige métallique rR, qui communique par la lame de cuivre RR'R'' à

une autre tige métallique $l'l$, terminée à sa partie supérieure par la coupe l. Une autre lame part de la coupe c, parcourt, à plusieurs reprises, le rectangle $jj'd'$, perpendiculaire au plan de la table, et se termine par la coupe d. Cette lame est enveloppée de soie, pour prévenir toute communication latérale entre ses divers contours. Elle pourrait être remplacée par un simple fil de cuivre. La colonne centrale Ty se prolonge sous la table jusqu'à une traverse en bois, dont la partie supérieure est armée d'une bande de cuivre Kq', soudée au point K, à la colonne KT; sur la partie latérale et antérieure de la traverse la lame de cuivre R'R'', soudée à la tige rR se prolonge jusqu'au point p, qui la met en communication avec le ressort $uu't$ et la tige tS, terminée par la coupe S.

A droite de la table on voit un cercle PP' soutenu par deux crampons P et P', et portant deux coupes, dont l'une o s'appuie sur le bord de la table, l'autre q communique par la tige qq', et la lame de cuivre q'K avec la colonne centrale KT. Enfin, deux lames revêtues de soie parcourent, à plusieurs reprises, l'une le contour ABCDEFGH, l'autre le rectangle AB'C'D'E'G'H'; la première se termine aux deux coupes e, f, la seconde aux coupes e', f'.

Après cet aperçu général de l'appareil électro-dynamique, j'entre dans le développement des phénomènes.

§ 5. *Il y a répulsion entre les parties successives d'un même courant, dirigées suivant une même droite.*

Cette expérience ne peut réussir qu'avec une forte pile et une grande surface de mercure; cette dernière condition n'a pas permis de la disposer dans l'appareil (fig. 1). Le plus sûr et le plus facile est d'employer un grand plat en faïence ou en porcelaine, que l'on sépare en deux parties, dans toute sa longueur, par une cloison de verre, fixée avec du mastic. On verse du mercure dans les deux moitiés du plat, et on met sur le mercure le conducteur (fig. 2), de manière que les deux côtés $\alpha\beta$ et $\delta\varepsilon$ soient parallèles à la cloison, et que l'arc vertical $\beta\gamma\delta$ passe par dessus cette même cloison. Le fil de cuivre qui forme le conducteur mobile est revêtu de soie. Tout étant ainsi disposé, on plonge les deux rhéophores dans le mercure, sur le prolongement des deux côtés $\alpha\beta$ et $\delta\varepsilon$. Alors le courant ne peut que suivre $\alpha\beta$, monter dans l'arc vertical $\beta\gamma\delta$, et parcourir la branche $\delta\varepsilon$. Au moment de l'immersion, le conducteur s'éloigne parallèlement à lui-même, jusqu'à ce qu'il soit arrêté sur les bords opposés du plat. Cette répulsion n'a pas lieu seulement à distance infiniment petite entre les parties qui se suivent immédiatement, elle a lieu entre toutes les parties d'un même cou-

rant à distances finies, comme le prouve le fait suivant.

§ 6. *Deux courans qui font un angle quelconque se repoussent lorsque l'un d'eux va en s'approchant du sommet de l'angle, et l'autre en s'en éloignant.*

On manifeste cette propriété des courans avec le conducteur mobile (fig. 3), dont les deux pointes d'acier l et z' plongent dans les coupes désignées par les mêmes lettres dans la figure première (1). Après avoir fixé le rhéophore positif dans la coupe r, on met le tourniquet O dans la coupe d, et le rhéophore négatif dans la coupe c; alors le courant parcourt les conducteurs dans l'ordre rR$l'l\alpha\beta zz'$TO$djj'd'c$, les deux portions de courans dj et $l\alpha$ sont dans les circonstances prescrites, car le courant dans dj va en s'approchant du sommet de l'angle des deux directions, et il s'en éloigne dans $l\alpha$; le courant dj est redoublé plusieurs fois pour augmenter son intensité. Quelle que soit la position initiale du conducteur mobile, il est con-

(1) Je désignerai toujours par les mêmes lettres, les pointes des conducteurs mobiles et les coupes où ces pointes viennent aboutir. Ce procédé fera mieux comprendre la position de chaque conducteur par rapport à l'appareil fixe. C'est pour en donner un exemple, que le conducteur (fig. 3) a été dessiné en place dans la première planche.

stamment ramené dans une situation opposée à dl, et il s'y arrête après quelques oscillations.

Pour cette expérience, il faut tourner la tige recourbée $z\zeta z'$ qui soutient la coupe z du côté de la colonne TK, afin que la partie εz du conducteur mobile ne soit pas arrêtée par cette tige; la même coupe sert, comme nous le verrons bientôt, à une expérience pour laquelle on doit tourner la tige en sens contraire; c'est pour cette raison qu'au lieu de souder $z\zeta z'$ au support yx, on la termine par une autre coupe z', dans laquelle plonge une lame métallique soudée à la potence yT; par ce moyen on peut, sans rompre les communications, tourner la courbure dans tous les sens.

Puisque la répulsion de deux courans angulaires a lieu quel que soit l'angle de ces courans, elle doit encore s'observer lorsqu'ils deviennent parallèles.

§ 7. *Il y a répulsion entre deux courans parallèles qui vont en sens contraire.*

On l'obtient avec le conducteur (fig. 3), dont on amène la partie $\gamma\delta$, en contact avec un fil de cuivre qui s'élève verticalement de la coupe h, et se recourbe deux fois à angle droit pour plonger dans i, comme le montre la (fig. 4); on met le rhéophore positif dans la coupe r, le tourniquet dans a et le rhéophore négatif dans b; le courant suit la route rR$l'l\gamma\delta z'z$OaT$'x'i'hb$, il est ascendant dans $\gamma\delta$ et

descendant dans $i'h$; à l'instant où l'on établit les communications, le conducteur mobile s'éloigne indéfiniment du conducteur fixe hi'.

§ 8. *Deux courans qui font un angle s'attirent quand ils vont tous deux en s'approchant ou tous deux en s'éloignant du sommet.*

Pour le prouver, on met le tourniquet dans la coupe c, le réophore négatif dans d, et on dispose le reste de l'expérience comme celle du n° 6, la marche du courant est $r'\mathrm{R}l'l\alpha\beta z\mathrm{TO}cd'j'jd$; il va en s'éloignant du sommet de l'angle $dl\alpha$ dans les deux branches jd et $l\alpha$; alors, quelle que soit la position initiale du courant mobile, il est constamment ramené au-dessus de dj, et il s'y fixe après quelques oscillations; pour ne pas gêner les mouvemens du conducteur, on tourne la tige $z\zeta z'$ du côté opposé à la colonne TK

En mettant le rhéophore positif dans la coupe d et le rhéophore négatif dans r', sans rien changer au reste de l'appareil, le courant va en s'approchant du sommet dans les deux branches Jd et $l\alpha$, et les phénomènes sont absolument les mêmes que dans la disposition précédente, où ils allaient tous deux en s'éloignant.

§ 9. *La répulsion entre deux courans, dont l'un va en s'approchant et l'autre en s'éloignant du sommet de l'angle formé par leurs directions, est égale à l'attraction qui a lieu entre les mêmes*

courans lorsqu'ils vont tous deux en s'approchant ou tous deux en s'éloignant du sommet.

Pour cette expérience, on plie un fil de cuivre revêtu de soie, comme le marque la fig. 5; il se trouve alors composé de deux parties égales $y\alpha\beta\gamma$ et $\gamma\delta\varepsilon y'$, qui seront toujours parcourues en sens contraire. On suspend cet instrument dans les deux coupes y' et y, et on établit les communications dans l'ordre suivant: $r'T'y'\varepsilon\delta\gamma\beta\alpha y TOdjj'd'c$; l'appareil reste en repos dans toutes les positions.

Ce résultat prouve que l'on a pu, dans l'expérience du n° 7, négliger les deux parties horizontales $\delta\varepsilon$ et $\beta'\gamma$, car puisqu'elles sont toujours parcourues en sens contraires, l'attraction exercée sur l'une est égale à la répulsion exercée sur l'autre; quant à la branche $l\alpha\beta\beta'$, elle agit de trop loin, et sous un angle trop défavorable, pour que son action puisse avoir une influence sensible sur le résultat de l'observation.

§ 10. *La répulsion entre deux courans parallèles, qui vont en sens contraire, se change en une attraction égale, lorsque les deux courans sont dans le même sens.*

On prouve d'abord qu'il y a attraction en disposant l'expérience comme celle de la répulsion (n° 7), avec cette seule différence, que le rhéophore négatif doit être placé dans a et le tourniquet dans b: la marche du courant est $rRl'l\gamma\delta zObhi'x'T'a$;

il est ascendant dans hi' et dans $\gamma\delta$, et le conducteur mobile revient constamment s'appliquer contre le fil vertical hi', de quelque côté qu'on l'en écarte.

Pour prouver que l'attraction, dans ce cas, est égale à la répulsion dans le cas contraire, on se sert encore du conducteur (fig. 5). On met le rhéophore positif dans r', le tourniquet dans a, le rhéophore négatif dans b, le courant s'établit dans la direction $r'a\mathrm{T}y\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon y'x'i'hb$, et le conducteur reste en équilibre dans toutes les positions, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que la répulsion de hi' sur l'un des courans verticaux est contre-balancée par une attraction égale sur l'autre courant.

Le changement d'attraction en répulsion, et réciproquement, ne se manifeste pas seulement dans les deux cas où nous venons de l'observer, il a lieu sur des appareils contournés d'une manière quelconque, et on peut énoncer comme une première loi des phénomènes électro-dynamiques, le théorème suivant : *quelle que soit l'action d'un système de conducteurs fixes sur un conducteur mobile, elle se change en une action égale, et contraire, quand on renverse la direction du courant dans la partie mobile, ou dans le système fixe seulement.*

Il est évident que si l'on renverse la direction du courant dans le système de conducteurs fixes, et dans le conducteur mobile, en même temps on

rétablit l'action telle qu'elle était primitivement.

Cette dernière observation est importante, parce qu'elle fournit un caractère pour distinguer les effets qui sont dus à l'action mutuelle des différentes parties de l'appareil électro-dynamique, d'avec ceux qui dépendent de l'action de la terre, (car nous verrons plus tard que la terre agit sur les conducteurs voltaïques). Les premiers restent les mêmes quand on renverse la direction du courant dans tout le système, les seconds changent de sens dans le même cas.

La même remarque nous dirigera dans la construction d'appareils qui n'éprouvent de la part de la terre aucune action, et que l'on nomme *astatiques;* on devra les composer de parties semblables, parcourues en sens contraires, mais placées à des distances différentes des conducteurs fixes, car alors cette différence de distance suffira pour que l'action des conducteurs fixes sur les parties du conducteur mobile qui en sont voisines, l'emporte de beaucoup sur l'action contraire, et la compensation s'établira exactement pour la terre, parce que les différences de distances seront toujours inappréciables par rapport aux dimensions du globe.

Le conducteur (fig. 3) dont nous nous sommes servis, est construit d'après ce principe.

§ 11. *L'action d'un conducteur rectiligne est*

la même que celle d'un conducteur plié en ligne sinueuse, qui s'écarte très peu de la ligne droite, lorsqu'on les fait agir à la même distance sur un conducteur rectiligne.

On peut le prouver en substituant dans les expériences des n°s 9 et 10 le conducteur (fig. 6) à l'appareil (fig. 5); on observe en effet que dans l'une et l'autre expérience les deux conducteurs se comportent de la même manière, tous deux doivent être construits avec des fils de cuivre, couverts d'un ruban de soie.

Ce fait, qui sert de base au calcul de la loi mathématique des phénomènes que nous considérons, a été constaté avec précision, en suspendant un conducteur astatique entre deux conducteurs, l'un rectiligne, l'autre sinueux, parallèles entre eux, et placés avec le conducteur mobile dans le cas de la répulsion; alors ce dernier s'est constamment fixé après plusieurs oscillations au milieu de l'intervalle compris entre les deux conducteurs fixes; l'appareil qui a servi à constater ce fait a été décrit par M. Ampère, dans la collection de ses Mémoires, pag. 216 et suivantes.

On peut imiter cette expérience dans l'appareil (fig. 1) avec le conducteur de la fig. 3; pour cela, on met deux conducteurs, l'un rectiligne (fig. 4) dans les coupes *h* et *i'*, l'autre sinueux (fig. 7) dans les coupes *g* et *i*; on plonge le rhéophore positif

dans r, le négatif dans b, la marche du courant est $rRl\gamma\delta zxiga1'x'i'hb$, alors il est ascendant dans $\gamma\delta$, descendant dans le conducteur rectiligne hi', et dans le conducteur sinueux ig, et la branche mobile $\gamma\delta$ se fixe, après quelques oscillations, au milieu de l'intervalle entre les deux conducteurs fixes.

§ 12. Puisque la forme de la ligne sinueuse est tout-à-fait arbitraire, rien n'empêche de la remplacer par des élémens rectilignes, de substituer à chaque partie du conducteur $\alpha\beta$, par exemple (fig. 8), deux droites $\alpha\gamma$ et $\beta\gamma$, qui font un angle quelconque. Ce procédé est analogue à la composition des forces en Statique, et permet de présenter le fait sous cette forme, qui se prête facilement au calcul ou à des considérations géométriques : *on peut substituer à une petite ligne parcourue par un courant électrique deux ou plusieurs autres lignes animées par un courant de même intensité, et dont les longueurs et les directions auront, avec la ligne proposée, les mêmes relations qui existent entre une force et ses composantes.* Le résultat de cette substitution est d'autant plus exact, que les lignes que l'on considère sont plus petites.

§ 13. Jusqu'ici nous n'avons examiné que des courans parallèles, ou qui parcouraient chacun un des côtés d'un angle; mais on peut demander

ce qui arriverait si l'un des courans, ou tous les deux, se prolongeaient de l'autre côté du sommet, en suivant la même droite. Dans l'étude de ce nouveau genre d'action, nous appellerons, pour abréger, *courant terminé*, celui qui ne se prolonge pas au-delà du sommet de l'angle, et *courant indéfini* celui qui parcourt les deux parties d'une même droite, en avant et en arrière du sommet de l'angle que sa direction fait avec celle d'un autre courant terminé ou indéfini.

Soit $\alpha\beta$ (fig. 9) un courant indéfini, dont la direction est marquée par la flèche couchée sur cette ligne ; $\lambda\gamma$ un courant terminé, que nous considérerons d'abord dans le cas où il s'approche du sommet. Nous avons vu (n° 8) que l'action de $\lambda\beta$ sur $\lambda\gamma$ est une attraction dont je représenterai la direction par $\gamma\beta$, l'action de $\alpha\lambda$ sur $\lambda\gamma$ sera une répulsion égale (n° 9), et symétriquement placée, que je représenterai par $\gamma\varkappa$ en grandeur et en direction ; je prendrai $\gamma\varkappa$ sur le prolongement de $\alpha\gamma$, pour montrer que cette force est répulsive. En composant ces deux forces, on a une résultante $\gamma\iota$ parallèle au courant indéfini, et dirigée en sens contraire de ce courant, c'est ce que l'on exprime en disant : *un courant terminé qui s'approche d'un courant indéfini, tend à rétrograder sur ce dernier,* c'est-à-dire, à se transporter en sens inverse de la direction du courant indéfini.

Supposons maintenant que le courant terminé s'éloigne de $\alpha\beta$; alors il y aura attraction entre $\alpha\lambda$ et $\lambda\gamma$, et répulsion entre $\beta\lambda$ et $\lambda\gamma$; ces deux forces combinées d'après le principe du parallélogramme des forces donneront une résultante $\varepsilon\gamma$, dirigée dans le sens du courant indéfini, et parallèle à ce courant, donc : *un courant terminé qui s'éloigne d'un courant indéfini tend à marcher dans le sens de ce dernier.*

§ 14. Pour vérifier les conséquences que nous venons de déduire de l'action exercée par les courans angulaires, on se sert du conducteur fixe horizontal $e'A'B'E'G'H'f'$, qui entoure la table, en formant plusieurs circuits isolés les uns des autres par une enveloppe de soie. On descend sur le cercle de cuivre PP', un vase de même métal composé de deux parois cylindriques LMN,L'M'N' soudées au même fond. Dans le cylindre intérieur passe librement la tige S*t* dont nous avons vu le mode de communication avec la coupe *r* (n° 4); une petite languette de cuivre attachée sous le fond du vase, plonge dans la coupe *q* qui fait corps avec le cercle PP'. On verse de l'eau acidulée dans le vase, et on y suspend d'abord le conducteur (fig. 10), de manière que la couronne de cuivre $\alpha\beta\gamma$ plonge seule dans l'eau, ce que l'on peut toujours faire en élevant ou en abaissant la tige S*t*. On met le rhéophore

positif dans r, le tourniquet O dans e' et le rhéophore négatif dans f'. Alors le courant suit d'abord les conducteurs $rRR'putS$, se rend par les deux branches horizontales dans la couronne de cuivre, traverse l'eau acidulée, arrive par le fond du vase dans la coupe q, et complète le circuit par les conducteurs $qq'KOe'A'B'E'G'H'f'$. Dans les deux branches mobiles, il va du centre à la circonférence, et dans le courant indéfini sa direction est dans le sens E'G'. Puisque le conducteur mobile a deux branches, il faut, pour prévoir complètement les résultats, suivre la marche de l'une d'elles dans toutes ses positions, et en conclure ce qui doit arriver à leur ensemble. Soit E'G' (fig. 11), le courant indéfini; Sδ la position initiale de l'une des branches mobiles; si ce que nous avons dit dans le n° précédent est vrai, le courant terminé Sδ, qui s'approche de E'G', doit rétrograder sur ce courant, et cet effet aura encore lieu dans toutes les positions, telles que Sδ' pour lesquelles le courant terminé s'approche du courant indéfini; arrivé dans la position Sδ'', parallèle à E'G', l'aiguille mobile et le courant E'G' se trouvent dans le cas de deux courans parallèles qui vont en sens contraire; ils se repoussent, et Sδ doit s'élever au-dessus de la parallèle; or, dans toutes les positions Sδ''', Sδ^{iv}, Sδ^{v}, au-dessus de cette parallèle, Sδ va en s'éloignant du cou-

rant mobile ; il doit donc marcher dans le sens de ce courant, ce qui l'amènera en $S\delta^{vi}$, où il est attiré par le courant indéfini qui lui est parallèle et dirigé dans le même sens ; enfin, aussitôt que le courant dans $S\delta$ a pris une position telle que $S\delta^{vii}$, il va de nouveau en se rapprochant du conducteur indéfini, et doit, en rétrogradant sur ce conducteur, reprendre sa position initiale, et par conséquent, continuer de tourner indéfiniment autour de son extrémité fixe. Puisque le sens du mouvement de révolution est le même dans toutes les positions de l'aiguille $S\delta$, les deux aiguilles opposées $S\alpha$ et $S\gamma$ (fig. 10), tendront toujours à marcher dans le même sens ; et par conséquent, le système entier tournera toujours dans le même sens, son mouvement sera rétrograde pour l'aiguille la plus voisine du courant indéfini.

Ce résultat est en effet confirmé par l'expérience, les communications étant toujours établies comme je l'ai expliqué, l'appareil mobile tourne dans le sens LMN ; si l'on met le rhéophore négatif dans e' et le tourniquet dans f', on renverse la direction du courant dans E′G′, sans rien changer au conducteur mobile. Celui-ci tourne dans le sens NML ; les choses étant dans cet état, mettez le rhéophore négatif dans r, et le positif dans la coupe e', vous renversez la direction du courant, en même temps, dans le conducteur fixe et

dans le conducteur mobile, le mouvement reste dans le sens NML; enfin remettez le tourniquet dans e' et le rhéophore positif dans f', la direction du courant devient dans le conducteur fixe G'E', et dans le conducteur mobile αS, et l'appareil recommence à tourner dans le sens LMN.

Le conducteur mobile qui nous a servi pour cette expérience n'est pas astatique, aussi remarque-t-on que les mouvemens de révolution sont plus rapides dans un sens que dans l'autre : nous examinerons ces différences d'intensité lorsque nous étudierons l'action de la terre.

§ 15. Nous venons de voir qu'un courant terminé mobile rétrograde sur un courant indéfini, dont il s'approche, et marche dans le sens de ce courant lorsqu'il s'en éloigne; réciproquement, *un conducteur mobile indéfini, soumis à l'action d'un conducteur terminé fixe, marche dans le sens de l'électricité, lorsque le courant terminé va en s'approchant du conducteur indéfini, et en sens contraire, lorsque le courant terminé va en s'en éloignant.*

Pour le prouver, on suspend dans la coupe S le conducteur (fig. 12), composé d'un fil de cuivre plié en spirale αϐγ, dont les spires sont maintenues dans un même plan, par trois petites règles en bois, ou en baleine; l'extrémité intérieure de la dernière spire se recourbe en une crosse δS, qui

sert à la suspendre. On établit les communications comme il suit : *rRputS*$\delta\gamma\beta\alpha o$; le courant, après avoir suivi les contours de la spirale, s'échappe à travers l'eau acidulée dans les parois du vase, et arrive ainsi dans la coupe *o* ; de cette manière, tous les courans dans l'eau acidulée s'éloignent du courant indéfini de la spirale, et cette dernière se meut en rétrogradant, c'est-à-dire dans le sens $\alpha\beta\gamma\delta$ ou LMN. Si l'on change les deux rhéophores, en mettant le positif dans *o* et le négatif dans *r*, alors le courant passe des parois du vase à la spirale à travers l'eau acidulée, en se rapprochant du courant indéfini, et la spirale se meut dans la direction de ce courant, et par conséquent le mouvement de rotation a encore lieu dans le sens $\alpha\beta\gamma\delta$ ou LMN. Pour changer la direction de ce mouvement, il faut substituer à la spirale (fig. 12) une autre spirale semblable (fig. 13), mais pliée en sens contraire. Dans chacun de ces appareils le mouvement n'a pas la même intensité pour les deux positions contraires des rhéophores ; nous en verrons la cause en étudiant l'action de la terre.

L'expérience que je viens de décrire prouve aussi que *les courans qui traversent l'eau acidulée jouissent des mêmes propriétés que ceux qui parcourent des conducteurs métalliques.*

§ 16. *Deux courans indéfinis tournent, par leur action mutuelle autour de leur perpendicu-*

laire commune, jusqu'à ce qu'ils soient parallèles et dirigés dans le même sens.

Ce théorème est une conséquence de l'action des courans angulaires; en effet, soit $\alpha\beta$ et $\gamma\delta$ (fig. 14), deux courans indéfinis, qui se coupent sous un angle quelconque, et dont les directions sont indiquées par les flèches; il y a attraction dans l'angle $\alpha\varepsilon\delta$, où les deux courans s'approchent du sommet, et dans l'angle $\gamma\varepsilon\beta$, où les deux courans vont en s'éloignant; au contraire, il y a répulsion dans les angles $\delta\varepsilon\beta$ et $\alpha\varepsilon\gamma$, parce que dans ces deux angles, l'un des courans s'approche du sommet, tandis que l'autre s'en éloigne. Or, la résultante de l'attraction dans $\alpha\varepsilon\delta$, et de la répulsion dans $\delta\varepsilon\beta$, produit sur $\delta\varepsilon$ une force dirigée dans le sens $\lambda\delta$, qui tend à coucher $\varepsilon\delta$ sur $\varepsilon\alpha$; par la même raison, $\varepsilon\gamma$ tend à se confondre avec $\varepsilon\beta$; donc, si $\delta\gamma$ est libre de tourner autour du point ε, δ viendra se placer sur α et γ sur β, c'est-à-dire que les deux courans deviendront parallèles, et dirigés dans le même sens.

Pour manifester cette tendance, on se sert du conducteur mobile (fig. 15), composé de deux rectangles $\alpha\beta\iota\theta$ et $\gamma\delta\varepsilon\eta$ égaux et parcourus en sens contraires, ce qui rend l'appareil astatique; on le suspend dans les coupes yy', qui correspondent à peu près au-dessus du point C', milieu de B'D'; on établit les communications dans l'ordre sui-

vant : $r'T'y'\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\eta\iota\theta yTOe'B'D'f'$, et on observe que quelque position que l'on donne au conducteur mobile, il revient toujours, après quelques oscillations, se placer parallèlement à $B'D'$, l'extrémité δ du côté de B' et ε du côté de D' : si l'on met alors le rhéophore négatif dans e' et le tourniquet dans f', on renverse la direction du courant dans le conducteur fixe $B'D'$, sans rien changer au conducteur mobile, qui se retourne et se fixe, après quelques oscillations, dans une position directement opposée à la précédente, le point δ du côté de l'extrémité D' du courant indéfini, et ε du côté B'.

§ 17. Les deux branches verticales $\delta\gamma$ et $\varepsilon\eta$ contribuent à l'effet précédent, car la première $\delta\gamma$, dans laquelle le courant est descendant, tend à rétrograder sur le courant indéfini $B'D'$, et la branche ascendante $\varepsilon\eta$ tend à avancer sur ce même courant (n° 15). Cette action tend, comme celle du courant horizontal, à porter le point δ vers l'origine du courant indéfini, et le point ε dans la direction contraire. On peut manifester l'action des branches verticales avec le conducteur mobile (fig. 16), qui diffère du précédent, en ce que toutes les parties horizontales sont remplacées par des combinaisons de cercles sur lesquels, comme nous le verrons bientôt (§ 24), le conducteur fermé $A'B'C'D'E'H'$ n'exerce aucune action. Ainsi le courant descendant de y' en α et β,

passe de ce dernier point en γ par un demi-cercle, de là descend au point δ, se partage pour suivre les deux branches du cercle inférieure $\delta\varepsilon$, remonte par $\varepsilon\theta$, arrive en η, par un nouveau demi-cercle de θ en η suit ηc, se partage entre les deux demi-cercles qui vont de ι en λ, et revient par la courbure $\lambda\gamma$, neutraliser la portion $\gamma'\alpha$ En établissant les communications comme dans l'expérience précédente, on voit l'appareil se diriger, la branche descendante vers l'origine du courant indéfini, et la branche ascendante du côté opposé; mais les mouvemens qui ramènent le conducteur à cette position d'équilibre, sont beaucoup plus lents que pour le conducteur (fig. 15), ce qui fait voir que dans celui-ci l'effet principal était réellement dû à la partie horizontale $\delta\varepsilon$.

§ 18. En comparant les phénomènes observés dans les paragraphes 14 et 16, nous pourrons suivre, dans tous les cas, l'action mutuelle de deux courans dont l'un est fixe, et l'autre mobile autour d'une droite parallèle à leur perpendiculaire commune.

En effet, soit Sδ (fig. 17), un courant horizontal mobile autour du point S; supposons qu'on lui présente un second conducteur horizontal, 1°. en dehors du cercle décrit par l'extrémité δ; 2°. directement au dessus du centre δ; 3°. de manière à couper le cercle $\alpha\beta\gamma\delta$. Dans le premier cas, nous

avons vu (§ 14) que le courant mobile doit tourner continuellement dans le même sens. Dans le second cas, quand le conducteur fixe passe par le centre δ, soit ce conducteur EG, dans toutes les positions possibles, le courant mobile sera attiré par SE et repoussé par SG; il ne pourra donc s'arrêter que dans la position SE, parallèle au conducteur fixe. Soit maintenant le conducteur E′G′ qui coupe Sδ au point S′; il y aura attraction dans l'angle SS′E′ et répulsion dans l'angle SS′G′, la résultante de ces deux forces tendra à faire tourner Sδ dans le sens $\delta\alpha$; mais d'un autre côté, l'attraction dans l'angle δS′G′, et la répulsion dans l'angle E′Sδ, auront pour résultante une force qui tendra à faire tourner Sδ dans le sens $\delta\gamma$, et qui aura sur la résultante des deux autres forces, l'avantage d'agir par un plus grand bras de levier; lorsque les momens de ces deux forces seront égaux, Sδ se trouvera en équilibre. On doit donc, en rapprochant lentement du centre un conducteur horizontal placé un peu au-dessus de Sδ, trouver un point où le mouvement de rotation continu cesse pour faire place à une position fixe d'équilibre, qui sera d'autant plus rapprochée du diamètre SE, parallèle au conducteur fixe, que celui-ci sera plus près du centre.

Cette conséquence ne peut pas se vérifier avec l'appareil (fig. 1), parce qu'on ne peut pas y

adapter de conducteur horizontal astatique, mais l'expérience a été faite par M. Ampère avec deux vases semblables à LMN, placés l'un au-dessus de l'autre, et dont les centres étaient situés dans une même verticale; le conducteur mobile était composé de deux branches horizontales, et d'une branche verticale placée dans l'axe de l'appareil, le courant arrivant par l'une des branches horizontales dans le vase supérieur, descendait dans l'axe, et s'éloignait en suivant l'autre branche horizontale dans le second vase; par ce moyen le conducteur mobile devenait astatique.

§ 19. On rend le mouvement circulaire continu d'un conducteur horizontal plus rapide et plus régulier, en substituant au conducteur rectiligne fixe F′G′, un conducteur circulaire, dont le centre est au point de suspension du conducteur mobile, parce qu'alors ce dernier est toujours perpendiculaire sur la partie du conducteur fixe, voisine de son extrémité δ, et que la distance des deux conducteurs reste constante; on se sert à cet effet de l'appareil (fig. 18), qui consiste en une lame de cuivre revêtue d'un ruban de soie et pliée en spirale, d'un diamètre intérieur un peu plus grand que celui du vase LMN; les spires étant très rapprochées les unes des autres, chacune d'elles diffère très peu d'un cercle, et leur ensemble équivaut à un cercle unique d'une plus

grande énergie, comme l'ensemble des cinq conducteurs pliés sur E'G', équivaut à un seul conducteur dont le courant serait cinq fois plus fort que celui de la pile. Pour faire circuler le courant dans cette spirale, on la termine à ces deux extrémités par deux appendices nus π et ϕ. On place la spirale autour du vase LMN, de manière que son appendice extérieur π plonge dans la coupe o soudée an vase, et son appendice intérieur ϕ dans la coupe n qui communique par une lame de cuivre nm avec la coupe m. On emploie le conducteur mobile (fig. 10), et on établit les communications en plongeant le rhéophore positif dans r, et le négatif dans m; la marche du courant est $rRptS\alpha o\pi\chi\mu\phi nm$: dans $S\alpha$ il va en s'approchant du conducteur fixe, $S\alpha$ doit par conséquent rétrograder sur la spirale, c'est-à-dire tourner d'un mouvement continu dans le sens $\phi\mu\chi\pi$, opposé à la direction de l'électricité; ce mouvement est bien dû à l'action mutuelle des divers conducteurs, car si l'on met le rhéophore positif dans m et le négatif dans r, sans rien changer au reste de l'appareil, le mouvement est encore le même; mais alors, $S\alpha$, dans lequel l'électricité va de la circonférence au centre, tourne d'un mouvement continu dans le sens du courant de la spirale.

Pour changer le sens du mouvement de rota-

tion, il faut placer l'appendice extérieur π dans la coupe n', et l'intérieur φ dans o; alors, si le rhéophore positif est dans r, le courant dans la spirale a la direction $\varphi\mu\chi\pi$; dans Sα, il va du centre à la circonférence, c'est-à-dire en s'approchant de la spirale, Sα doit donc rétrograder, c'est-à-dire se mouvoir dans le sens $\pi\chi\mu\varphi$ opposé à celui de la disposition précédente; le sens du mouvement reste le même quand on change les rhéophores, parce qu'alors Sα parcouru de la circonférence au centre, doit suivre le sens du courant dans la spirale qui devient $\pi\chi\mu\varphi$.

§ 20. Les phénomènes ne seraient plus les mêmes si le centre du cercle ne coïncidait pas avec le centre de rotation; pour s'en assurer, il suffit de retourner la spirale de manière que ses deux extrémités plongeant toujours dans les coupes n et o, sa circonférence s'appuie sur la partie G'mE' de la table; alors si l'on suppose les communications établies dans l'ordre $mn\pi\chi\mu\varphi p$StRr, le courant allant de la circonférence au centre dans la branche horizontale Sα, celle-ci doit tendre à avancer sur le courant de la partie de la spirale la plus voisine, c'est-à-dire à tourner dans le sens LMN, et l'expérience montre que cette tendance a lieu dans toutes les positions du courant mobile, car on obtient un mouvement de rotation continu et dont la direction est opposée

à celle du courant circulaire ; en faisant changer l'ordre des communications dans le système, on trouve constamment que le mouvement de rotation continu imprimé par une spirale à un conducteur horizontal, change de sens lorsque le centre de la spirale est porté du centre de rotation à une distance de ce point, plus grande que la somme des deux rayons de la spirale et du cercle décrit par l'extrémité libre du conducteur mobile. Il résulte de cette expérience que si l'on pouvait, sans interrompre les communications, éloigner lentement le centre de la spirale du centre de rotation, on parviendrait à une position intermédiaire où la spirale donnerait au conducteur une position fixe d'équilibre.

§ 21. *Un courant circulaire fait tourner toujours dans le même sens, un conducteur parallèle à l'axe du cercle et mobile autour de cet axe.*

On prouve ce théorème en soumettant à l'action de la spirale (fig. 18), le conducteur (fig. 19) composé d'une couronne métallique $\alpha\beta\gamma$, destinée à plonger dans l'eau acidulée du vase LMN, de deux branches verticales $\beta\varepsilon$ et $\gamma\delta$, et d'une partie horizontale $\delta\varepsilon$ qui porte à son milieu une pointe S, par laquelle tout l'appareil repose sur la coupe S (fig. 1). On établit les communications comme dans l'expérience précédente, et on voit le con-

ducteur tourner constamment dans le même sens que l'appareil (fig. 10).

§ 22. On pourrait croire que le mouvement de rotation est dû à la partie horizontale, et dans ce cas on le détruirait et on le remplacerait par un mouvement en sens contraire, en substituant à la couronne $\alpha\gamma$ un fil horizontal, communiquant par son milieu avec l'axe de rotation. C'est ce que représente la fig. 20, pl. III. Quand on suspend ce conducteur sur la coupe S, de manière que le cylindre α plus large que L'M'N', plonge dans l'eau acidulée, alors si le courant après avoir parcouru la spirale dans un sens quelconque, arrive au vase par la coupe o, il passe à travers l'eau acidulée, se partage entre les deux branches $\alpha\beta$ et $\alpha\gamma$, monte dans les deux verticales $\beta\varepsilon$ et $\gamma\delta$, et revient à l'axe de rotation par les deux parties opposées εS et δS ; l'expérience faite avec ce conducteur et avec d'autres de formes variées, a conduit à ce résultat : *Un courant circulaire est sans action pour faire tourner autour d'un axe perpendiculaire à son plan, et passant par son centre, un conducteur quelconque, qui, partant d'un point de l'axe de rotation, vient se terminer à un autre point de la même ligne.*

En se servant du conducteur (fig. 20), comme je viens de l'expliquer, il peut arriver que le courant dans l'eau acidulée soit assez intense pour

donner à l'appareil une position fixe parallèle à ce courant, mais jamais on n'observe de mouvement continu.

§ 23. On fait l'expérience d'une manière plus concluante, et qui prouve en même temps que la propriété que l'on a découverte dans un courant circulaire appartient à un arc quelconque de ce courant.

On suspend dans les deux coupes *yy'* le conducteur astatique (fig. 21), composé de deux rectangles ιθηε et δγϐλ parcourus en sens contraire par le courant, et mobiles autour d'un axe vertical qui passe par le centre du demi-cercle CD formé par une partie du bord de la table. Pour s'assurer que l'axe de rotation du conducteur mobile passe exactement par le centre du demi-cercle, cet axe se termine à sa partie inférieure par une pointe que l'on fait répondre au point ω marqué sur une petite plaque de cuivre, en calant constamment d'une manière convenable. Sur le demi-cercle s'applique, en formant plusieurs contours, la lame de cuivre *e*ABCDEFGH'', terminée à ses deux extrémités par les deux coupes *ef*. Les contours de ce conducteur sont isolés les uns des autres par une enveloppe de soie qui recouvre la lame métallique. On fixe le rhéophore positif dans *r'*, on met le tourniquet dans l'une des coupes *e* ou *f*, et le rhéophore négatif dans l'autre. Et si, par exem-

ple, le tourniquet plonge dans la coupe e, la marche du courant est $r'T'\gamma'\iota\theta\varkappa\varepsilon\delta\gamma\beta\lambda\gamma TOeABCDEHf$; dans cet état, l'action des deux horizontales BC et DE est nulle, et il ne reste que l'action du demi-cercle sur le rectangle $\iota\theta\varkappa\varepsilon$, moins l'action contraire, mais beaucoup moindre à cause de la distance, sur le second rectangle. Pour prouver que l'action des branches horizontales est nulle, soit BC et DE (fig. 22), ces deux lignes $\theta\beta\varkappa\gamma$ la partie inférieure du conducteur mobile dans laquelle les flèches représentent la direction du courant; il y aura répulsion entre BC et $\varkappa\theta$, et attraction entre DE et $\beta\gamma$; ces deux forces sont égales, puisque l'angle des courans, leur distance, et leur intensité sont les mêmes de part et d'autre; elles tendent à faire tourner le conducteur mobile en sens contraire; elles se font donc équilibre : il en sera de même de l'attraction entre BC et $\beta\gamma$, avec la répulsion entre $\varkappa\theta$ et DE. Le même raisonnement s'appliquerait aux parties horizontales supérieures, et aux deux branches verticales $\iota\theta$ et $\gamma\delta$; donc l'action de ces deux parties rectilignes BC et DE est nulle, dans toutes les positions de l'appareil. L'action des parties verticales EF et GH est aussi nulle, comme il est aisé de le démontrer de la même manière. Il en est de même de la partie horizontale inférieure FG, en sorte qu'il ne reste d'autre action que celle de CD sur celui des deux

rectangles du conducteur mobile, dont la projection tombe sur le demi-cercle, et qui n'est pas détruite par l'action opposée qui s'exerce sur l'autre rectangle, parce que cette dernière est affaiblie par la distance. Or, l'expérience fait voir que le conducteur reste partout en équilibre; donc l'action du demi-cercle est aussi nulle. Or, ce résultat ne peut pas être attribué à ce que le conducteur mobile coupe le demi-cercle en parties dont les actions opposées se détruisent, car, excepté dans la situation perpendiculaire au diamètre CD, le demi-cercle est coupé inégalement; il faut donc que cette nullité d'action appartienne à tous ces arcs; ce que l'on peut énoncer ainsi: *Un courant qui se meut dans un arc de cercle quelconque, est sans action pour faire tourner autour de l'axe de ce cercle un conducteur dont les deux extrémités sont dans l'axe de rotation.*

§ 24. On peut varier à volonté la forme du conducteur mobile; par exemple, employer celui qui est représenté (fig. 23), composé de deux cercles, pour le rendre astatique; on pourrait encore employer le conducteur astatique (fig. 24). Ce dernier donne lieu à une remarque importante; le fil qui le forme se plie des deux côtés dans ses parties rectilignes sur une petite règle en bois, en suivant l'ordre indiqué par les lettres $\gamma\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\eta\theta\iota\gamma'$; il est symétrique des deux côtés de l'axe de sus-

pension, cette circonstance le rend astatique; et l'expérience prouve que le demi-cercle est sans action sur la moitié $\alpha\beta\gamma\delta$, placée de son côté; mais il est évident que les parties rectilignes $\alpha\beta$ et $\delta\mu$ se font mutuellement équilibre, parce qu'elles sont toujours parcourues en sens contraires, et qu'elles sont assez rapprochées l'une de l'autre pour qu'on puisse les considérer comme ne faisant qu'une seule droite : on en conclut que l'équilibre observé a lieu séparément pour le cercle $\beta\gamma\delta$, et qu'en général, *un courant qui se meut dans un arc de cercle quelconque, est sans action pour faire tourner autour de l'axe de ce cercle un conducteur fermé, situé d'une manière quelconque dans l'espace.* Ce résultat ne peut pas être démontré par des expériences directes, parce que pour conserver les communications d'un conducteur mobile, il faut nécessairement que les points d'arrivée et de sortie du courant soient en même temps les points de suspension.

En vertu de l'égalité entre l'action et la réaction, on peut déduire de ce théorème le suivant : *Un conducteur fermé situé d'une manière quelconque dans l'espace, est sans action pour faire tourner un arc de cercle autour d'un axe perpendiculaire à son plan, et passant par son centre.* Tel est le principe qui a guidé dans la construction de l'appareil (fig. 16), et qui con-

ſirme les résultats obtenus dans le § 17, en prouvant, comme je l'ai énoncé dans ce numéro, que le conducteur fermé A′B′C′D′H′ est sans action pour faire tourner autour de l'axe de suspension, tous les arcs de cercle qui font partie du conducteur mobile.

DEUXIÈME PARTIE.

Sur les lois mathématiques des Phénomènes électro-dynamiques.

§ 25. Lorsqu'on vient à découvrir un nouveau genre d'action jusqu'alors inconnu, le premier objet du physicien doit être de déterminer les principaux phénomènes qui en résultent, et les circonstances où ils se produisent; il reste ensuite à trouver le moyen d'y appliquer le calcul en représentant par des formules, la valeur des forces qu'exercent les unes sur les autres, les particules des corps où ce genre d'action se manifeste. Dans l'action mutuelle des conducteurs voltaïques, l'impossibilité de soumettre à l'expérience des portions infiniment petites du circuit, oblige nécessairement à partir des observations faites sur des fils conducteurs de grandeur finie, et il faut satisfaire à ces deux conditions, que les observations soient susceptibles d'une grande pré-

cision, et qu'elles soient propres à déterminer la valeur de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites. C'est ce qu'on peut obtenir de deux manières. L'une consiste à mesurer avec la plus grande exactitude des valeurs de l'action mutuelle de deux portions d'une grandeur finie, en les plaçant successivement, l'une par rapport à l'autre, à différentes distances et dans différentes positions; car il est évident qu'ici l'action ne dépend pas seulement de la distance; il faut ensuite faire une hypothèse sur la valeur de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites, en conclure celle de l'action qui doit en résulter pour les conducteurs de grandeur finie, sur lesquels on a opéré, et modifier l'hypothèse jusqu'à ce que les résultats du calcul s'accordent avec ceux de l'observation. Il existe une autre manière d'atteindre le même but plus directement, elle consiste à constater par l'expérience, que les parties mobiles des conducteurs sont, en certains cas, exactement en équilibre entre des forces égales ou des momens de rotation égaux, quelle que soit d'ailleurs la forme de la partie mobile, et de chercher directement, à l'aide du calcul, quelle doit être la valeur de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites, pour que l'équilibre soit en effet indépendant de la forme de la partie mobile.

Ce dernier procédé ne peut être employé que

quand la nature de l'action qu'on étudie donne lieu à des cas d'équilibre indépendans de la forme des corps; il est, par conséquent, beaucoup plus restreint dans ses applications que le précédent; mais puisque les conducteurs voltaïques présentent des circonstances où cette sorte d'équilibre a lieu, il est naturel de le préférer à tout autre, comme plus direct et plus simple. Il y a d'ailleurs, à l'égard de l'action exercée par ces corps, un motif bien plus décisif encore pour le suivre dans les recherches relatives à la détermination des forces qui la produisent, c'est l'extrême difficulté des expériences où l'on se proposerait, par exemple, de mesurer ces forces par le nombre des oscillations d'un corps soumis à leur action; cette difficulté vient de ce que, quand on fait agir un conducteur fixe sur une portion mobile du circuit voltaïque, les parties de l'appareil nécessaires pour établir les communications de la portion mobile, agissent sur elles en même temps que le conducteur fixe, et altèrent ainsi les résultats des expériences.

§ 26. C'est donc par l'observation des cas d'équilibre indépendans de la forme des conducteurs, qu'il convient de déterminer la force dont nous cherchons la valeur. Il en existe trois, exposés dans la première partie de cet Essai. Le premier consiste dans l'égalité des valeurs absolues de l'attraction

et de la répulsion qu'on produit en faisant passer alternativement, en deux sens opposés, le même courant dans un conducteur fixe dont on ne change ni la situation, ni la distance au corps sur lequel il agit. Le second consiste dans l'égalité d'action sur un fil rectiligne mobile, de deux conducteurs fixes, situés à égales distances du conducteur mobile, dont l'un est rectiligne et l'autre plié et contourné d'une manière quelconque, quelles que soient d'ailleurs les sinuosités formées par ce dernier.

Il résulte de cette observation, que l'on peut remplacer une petite portion de courant compris entre deux points donnés par d'autres portions du même courant, qui suivent une petite ligne courbe ou brisée quelconque, terminée aux mêmes points, et qui ne s'en écarte nulle part à une distance finie, et cette substitution ne change en aucune manière l'action exercée à quelque distance que ce soit, par la petite portion de courant que l'on considère sur une autre portion de courant électrique, éloignée de la première d'une quantité finie. Pour déduire de ce résultat la loi mathématique des phénomènes, il suffit de choisir parmi tous les systèmes de courans que l'on peut substituer à une portion rectiligne infiniment petite, celui qui se prête le plus facilement au calcul. Or, dans un plan, ce sont les deux côtés

du parallélogramme dont la portion donnée forme la diagonale, et dans l'espace à trois dimensions, on peut remplacer un de ces côtés par deux autres parallèles à des droites données; on obtiendra ainsi pour un élément de la ligne suivie par un courant, trois autres courans parallèles aux axes des coordonnées, et formant les arêtes d'un parallélépipède dont l'élément donné est la diagonale.

On voit que cette décomposition des courans est analogue à celle des forces en Statique; mais ici ce n'est pas la force du courant qui est décomposée, c'est le courant qui est remplacé par d'autres équivalens, de telle sorte que si l'on veut avoir l'action mutuelle de deux courans dirigés d'une manière quelconque, il faut après leur avoir substitué des courans parallèles aux coordonnées, évaluer l'action du premier courant parallèle à l'axe des z sur chacun des trois courans qui remplacent le second, faire la même opération sur le premier courant parallèle aux y et le premier parallèle aux x, et ajouter les neuf actions qui en résultent et qui s'exercent toutes suivant la ligne qui joint les milieux des deux courans donnés.

On simplifie le problème en observant que dans toutes les expériences, l'attraction se change en répulsion ou réciproquement, quand on renverse la direction d'un des courans seulement. Il en résulte que les parties de l'action totale qui ne chan-

gent pas par ce renversement sont nulles. Or, il en est ainsi de l'action d'une petite portion de courant sur une autre petite portion située dans un plan perpendiculaire à sa direction et passant par son milieu. Car alors les deux parties supérieure et inférieure du courant perpendiculaire, étant situées d'une manière parfaitement semblable par rapport au plan, l'action sera exactement la même, soit que le courant monte, soit qu'il descende dans la perpendiculaire. Il n'en serait plus de même, si au lieu d'une perpendiculaire, on prenait une oblique, car si le courant descendant s'approchait du pied de l'oblique en faisant avec le plan un angle aigu, le courant devenu ascendant s'approcherait du pied en faisant un angle obtus; l'angle droit est donc le seul pour lequel la position relative des deux petits courans et par suite leur action n'éprouve pas de changement par le renversement de direction; elle doit donc être nulle pour ce cas particulier.

§ 27. Nous pouvons maintenant procéder à la recherche de la loi mathématique des phénomènes; pour simplifier les constructions géométriques, on ne mettra sur les figures que la moitié de chaque petit courant qui partant de leur milieu, suit la direction de l'électricité.

Supposons d'abord les deux courans perpendiculaires à la ligne qui joint leurs milieux, et

considérons-les situés, 1°. dans le même plan; 2°. dans des plans différens.

Premier cas, soit AG$=ds$ (fig. 25), un des élémens de la courbe parcourue par le premier courant; BH$=ds'$, un élément de celle du second, AB leur distance. Si l'on suppose d'abord les deux courans dans le même plan, et par conséquent parallèles, l'attraction qu'ils exercent l'un sur l'autre, quand ils sont dans le même sens, ne peut, conformément à ce qui a lieu pour toutes les actions de ce genre que les physiciens ont considérées jusqu'à présent, qu'être proportionnelle aux produits des intensités des parties de courant divisé par une fonction de la distance. Cette fonction est complètement inconnue; l'analogie, avec toutes les forces connues jusqu'à présent, porterait à la supposer proportionnelle au carré de la distance, mais pour plus de généralité, nous la représenterons par une puissance de cette même quantité. Or, les quantités i et i' qui marquent les intensités absolues des courans, restant les mêmes dans toute leur étendue, chaque portion infiniment petite considérée comme rectiligne, a une intensité relative proportionnelle à sa longueur, ce qui donne pour les deux élémens que l'on considère, ids et $i'ds'$; par conséquent en appelant r la ligne AB, l'attraction cherchée sera $\frac{ii'dsds'}{r^n}$

Il faut maintenant ramener à cette mesure, l'action qui a lieu lorsque les deux petites portions de courans électriques, toujours perpendiculaires à la ligne qui marque leur distance, ne sont plus dans le même plan. Soit alors γ l'angle des deux plans ABH et BAG (fig. 25), et concevons deux plans rectangulaires BF, BE passant par la même ligne AB, dont le premier forme avec eux les angles η et η', et le second les angles $90° - \eta$, $90° - \eta'$, les angles η et η' auront évidemment entre eux la relation $\eta' - \eta = \gamma$; la portion de courant AC pourra être remplacée par deux autres courans AM, AN d'une même intensité absolue situés dans les deux plans rectangulaires, et dont les longueurs seront égales aux lignes qui représenteraient les composantes dans ces deux plans d'une force égale à ids, c'est-à-dire $ids \sin \eta$ et $ids \sin \eta'$; de même BH sera remplacé par deux courans BP, BQ qui auront pour intensité relative $i'ds' \sin \eta'$ et $i'ds' \cos \eta'$. On aura ainsi dans le plan BF, les deux courans AM et BP, dont l'attraction mutuelle sera, d'après ce qui précède, $\frac{ii'dsds' \sin \eta \sin \eta'}{r^n}$, et dans le plan BE les deux courans AN et BQ, dont l'attraction aura pour mesure $\frac{ii'ds'ds \cos \eta \cos \eta'}{r^n}$; les courans situés dans l'un des plans n'auront pas d'action sur ceux de

l'autre plan, d'après ce qui a été démontré que l'action d'une portion infiniment petite de courant, est nulle sur tous les courans situés dans le plan passant par son milieu, et perpendiculaire à sa direction : l'attraction totale sera par conséquent égale à la somme des deux valeurs obtenues dans chaque plan, c'est-à-dire à......

$$\frac{ii'dsds'\,(\sin\eta\,\sin\eta' + \cos\eta\,\cos\eta')}{r^n} = \frac{ii'dsds'\cos\gamma}{r^n},$$

puisque $\eta' - \eta = \gamma$.

Telle est la valeur de l'action cherchée, quand les portions infiniment petites de courans électriques que l'on considère, sont toutes deux perpendiculaires à la ligne qui joint leurs milieux. Cette action est attractive tant que l'on a $\gamma < \frac{\pi}{2}$ elle est nulle avec le cosinus de γ, quand $\gamma = \frac{\pi}{2}$, comme cela doit être d'après ce qui a été démontré plus haut, et elle se change en répulsion quand $\gamma > \frac{\pi}{2}$, parce que $\cos\gamma$ est alors négatif, ce qui est conforme à l'expérience. Enfin, quand $\gamma = \pi$, on trouve que l'action est exprimée par $\frac{-ii'dsds'}{r^n}$, c'est-à-dire que c'est une répulsion égale à l'attraction qui a lieu quand on fait $\gamma = 0$. Toute puissance impaire de $\cos\gamma$, mise à la place de ce cosinus, donnerait également ces derniers résultats, mais ne pour-

rait s'accorder avec la loi de l'égalité entre les actions exercées par un conducteur sinueux, et par un conducteur rectiligne, dont la formule précédente est, comme on voit, une suite nécessaire.

Lorsque les deux petites portions de courans électriques ne sont pas perpendiculaires à la ligne qui en joint les milieux, et que les angles que j'ai nommés α et β, ont une valeur quelconque, on peut toujours, d'après la même loi, et sans qu'il en résulte aucun changement dans l'action dont on cherche la valeur, à la place de chaque portion de courant électrique en substituer deux autres, l'une dirigée suivant la ligne qui en joint les milieux, l'autre perpendiculaire à cette ligne dans le plan qui lui est commun avec la petite portion de courant qu'on décompose ainsi. Ces courans composans sont (fig. 26), pour AG, AN et AM, pour BH, BQ et BP. On aura ainsi deux courans AN et BQ dans la direction de la droite AB, dont les intensités relatives seront $i \cos \alpha\, ds$, et $i' \cos \beta ds'$, et deux AM et BP perpendiculaires à cette ligne dans les plans BE et BF, qui forment entre eux l'angle FBE, que nous avons déjà nommé γ, et que nous continuerons de désigner ainsi ; leurs intensités relatives seront $i \sin \alpha ds$ et $i' \sin \beta ds'$, ces deux dernières portions de courans étant situées l'une à l'égard de l'autre, comme celles dont nous venons de déterminer l'action mu-

tuelle ; nous aurons pour la valeur de leur attraction $\frac{ii' \sin \alpha \sin \beta ds ds'}{r^n}$.

Quant aux deux petites portions AN et BQ, il ne pourra y avoir aucune action entre la première et BP, parce que la direction AN est comprise dans le plan élevé perpendiculairement sur le milieu du courant BP. Par la même raison, il n'y aura aucune action entre BQ et AM. Reste à savoir s'il y a une action mutuelle entre deux courans qui, comme AN et BQ, sont dirigés suivant une même droite. Il est clair que dans ce cas il faudrait ajouter cette action à celle qui s'exerce entre AM et BP; alors si ces deux portions de courans dont les intensités relatives sont $ids \cos \alpha$ et $i'ds' \cos \beta$, se trouvaient relevées de manière à devenir parallèles, leur action serait $\frac{ii' ds ds' \cos \alpha \cos \beta}{r^n}$. Lorsque les deux courans reprennent leur situation dans une même droite AB, leur action ne peut être qu'une certaine partie de la précédente, c'est-à-dire qu'on pourra la mettre sous la forme $\frac{kii' ds ds' \cos \alpha \cos \beta}{r^n}$, k étant un coefficient constant; la formule générale devient d'après cela ....

$$\frac{ii' ds' ds (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + k \cos \alpha \cos \beta)}{r^n}.$$

Nous avons vu qu'il y a répulsion entre les

parties successives d'un courant qui parcourt une ligne droite; donc le terme de la formule qui exprime cette partie de l'action doit être négatif lorsque les deux petits courans AN et BQ sont dirigés dans le même sens, c'est-à-dire lorsque $\cos \alpha$ et $\cos 6$ sont de même signe. Or, dans ce cas, $\frac{\cos \alpha \cos 6}{r^n}$ est essentiellement positive, puisque la distance des deux courans ne peut pas être négative; donc le coefficient k est nécessairement négatif.

§ 28. Il reste maintenant à déterminer la valeur du coefficient constant k; mais, comme on ne peut y parvenir qu'à l'aide d'une transformation de la formule, je crois devoir d'abord expliquer cette transformation.

Soient BM et B'M' (fig. 27) deux lignes représentant des fils conducteurs, et qui seront en général deux courbes à double courbure; désignons par s et s' les arcs BM et B'M', comptés depuis les points fixes B et B', $Mm = ds$, $M'm' = ds'$ seront deux portions infiniment petites de ces conducteurs, et leurs directions seront déterminées par les deux tangentes MT, M'T'. En nommant r la distance MM', r sera évidemment une fonction des deux variables indépendantes s et s'; si l'on abaisse des points m et m' sur MM', les perpendiculaires me, $m'e'$, qui pourront être considérées

comme de petits arcs de cercle décrits respectivement des centres M′ et M, et qu'on prenne les angles α et β de manière qu'ils aient leur ouverture tournée du même côté, comme on l'a supposé dans le calcul de la formule, l'angle α étant pris, par exemple, entre la direction MT de Mm et le prolongement MK de M′M, et l'angle β entre la direction M′T′ de M′m' et la ligne MM′ elle-même, on aura ces deux équations,

$$\cos\alpha = \frac{dr}{ds},$$

$$\cos\beta = -\frac{dr}{ds'},$$

parce que le point M′ reste fixe quand s varie seul dans la fonction r, et le point M quand c'est s'; on tire de là $\cos\alpha\ \cos\beta = -\frac{dr}{ds} \times \frac{dr}{ds'}$ (1); en différenciant la valeur de $\cos\beta$ par rapport à s, on trouve

$$\frac{d\beta}{ds}\sin\beta = \frac{d^2r}{dsds'};$$

mais quand le point M est transporté en m, et que s devient $s + ds$, l'angle β diminue évidemment tant que l'angle γ des deux plans M′MT, MM″T′ est aigu, d'une quantité qui est la projection de l'angle MM′m sur le plan MM′T′; et comme cet angle est infiniment petit, on a $d\beta = -$ MM′m $\cos\gamma$, valeur qui s'applique aussi

au cas où γ est un angle obtus, parce qu'alors β augmente avec s ; mais l'angle MM'm a pour mesure $\frac{me}{M'M} = \frac{ds \sin \alpha}{r}$, $\frac{d\beta}{ds} = -\frac{\sin \alpha \cos \gamma}{r}$, d'où il suit que $\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma = -\frac{rd^2r}{dsds'}$ en substituant dans la formule

$$\frac{ii'dsds'\ (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + k \cos \alpha \cos \beta)}{r^n}$$

$$= -\frac{ii'dsds'}{r^n}\left(r\frac{d^2r}{dsds'} + k\frac{dr}{ds} \times \frac{dr}{ds'}\right)$$

$$= -\frac{ii'dsds'}{r^n} \times r^{1-k}\left(r^k\frac{d^2r}{dsds'} + k\, r^{k-1}\frac{dr}{ds} \cdot \frac{dr}{ds'}\right)$$

$$= -\frac{ii'dsds'}{r^n} \times r^{1-k}\, \frac{d\left(r^k \frac{dr}{ds}\right)}{ds'}$$

$$= -\frac{ii'dsds'}{r^n} \times \frac{r^{1-k}}{1+k}\ \frac{d^2(r^{1+k})}{dsds'}.$$

Si l'on désigne, conformément à une notation employée dans divers ouvrages, et notamment dans le Traité de Mécanique de M. Poisson (t. I, art. 171), par dr la différentielle de la distance r relative au déplacement du point M, et par $d'r$ la différentielle de la même distance relative au deplacement du point M', en sorte que ce qui dans la notation ordinaire est exprimé par $\left(\frac{dr}{ds}\, ds\right)$ le soit par dr, que ds' soit remplacé par $d's'$ et que $\frac{dr}{ds'}\, ds'$ le soit par $d'r$, on pourra écrire l'expres-

sion de l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de courans sous l'une de ces deux formes :

$$-ii'r^{1-n-k}d'(r^k dr)\ldots(2),$$

$$\frac{-ii\,r^{1-n-k}\,dd'(r^{1+k})}{1+k}\ldots(3).$$

On pourra se servir de celle des deux valeurs qui conviendra mieux au but qu'on se propose dans chaque cas particulier. Pour faire usage de ces formules, on calculera la valeur de r en fonction des six coordonnées des deux points M et M', que ces coordonnées soient trois droites perpendiculaires ou deux droites et un angle, ou deux angles et une droite, et on en déduira par de simples différentiations les valeurs des différentielles partielles de r qui entrent dans la formule qu'on emploie, en ayant soin de ne faire varier que les trois coordonnées du point M dans les différentiations marquées par le signe d, et que celles du point M' dans les différentiations qu'indique le signe d'.

Un des avantages de la valeur que nous venons de trouver, consiste à ce qu'on peut n'exécuter que les différentiations relatives au changement de position de l'un des points M ou M', et se contenter d'indiquer l'autre, ce qui simplifie beaucoup les calculs dans certains cas, comme on le

verra dans la détermination de la valeur du coefficient constant d'après le troisième cas d'équilibre que nous avons décrit dans la première partie, et qui peut s'énoncer ainsi :

Un circuit fermé circulaire ne peut jamais produire de mouvement continu toujours dans le même sens, en agissant sur un conducteur mobile d'une forme quelconque, qui part d'un point de l'axe du cercle, et qui se termine à un autre point du même axe, lorsque le conducteur mobile ne peut que se mouvoir en tournant autour de cette ligne.

§ 29. Pour exprimer analytiquement ce théorème, considérons un courant circulaire horizontal dirigé en M′ (fig. 28), suivant la tangente M′T′, et agissant sur une portion infiniment petite d'un conducteur mobile BM, assujetti à tourner autour de la verticale Az passant par le centre A du cercle dont le courant horizontal parcourt la circonférence, et dont nous nommerons le rayon a; Az étant pris pour axe des z, la verticale MN sera l'ordonnée z du point M; prenons pour les deux autres coordonnées de ce point, la distance AN $= r$, et l'angle XAN $= t$; en nommant t' l'angle XAM, on aura évidemment

$$r^2 = \text{MN}^2 + \text{MN}'^2 = z^2 + a^2 + u^2 - 2au \cos(t' - t),$$

expression où t' varie seul quand le point u se

déplace, en sorte que

$$d'r = \frac{aud't' \sin (t'-t)}{r},$$

et que l'action d'une portion infiniment petite du courant horizontal situé en M', sur une portion infiniment petite du conducteur BM située en M, est représentée par

$$-aii'r^{1-n-k}\, d't' d\,[r^{k-1} u \sin (t'-t)].$$

Si l'on décompose cette force suivant la ligne MO, perpendiculaire au plan AMNK, et qu'on abaisse du point M sur le rayon ANK, la perpendiculaire $\text{MK} = a \sin (t'-t)$, qui sera évidemment parallèle à MO, il faudra, pour avoir la composante suivant MO, multiplier la force suivant MM', dont nous venons de trouver la valeur par $\frac{\text{M'K}}{\text{MM'}}$, ce qui donnera

$$-a^2 ii' dt' r^{-n-k} \sin (t'-t)\; d\,[r^{k-1} u \sin (t'-t)];$$

en multipliant cette quantité par la distance $\text{MQ} = u$ du point M à l'axe AZ, on aura pour le moment de rotation

$$-a^2 ii' d't' r^{-n-k} u \sin (t'-t)\; d\,[r^{k-1} u \sin (t'-t)].$$

Telle est l'action exercée par le petit arc ds' du conducteur fixe horizontal, pour faire tourner le petit arc ds du conducteur mobile autour de cet axe ; en l'intégrant relativement aux différentielles

désignées par d, on aura cette action telle qu'elle est exercée par le petit arc ds', sur tout le conducteur mobile : or, d'après l'expérience qui prouve que cette action est nulle toutes les fois qu'elle est prise entre deux limites pour lesquelles $u = o$, quelle que soit d'ailleurs la forme du conducteur mobile et sa position relativement au petit arc ds' situé en M', c'est-à-dire quelles que soient les valeurs de r et de t en fonctions de u, qu'il faudrait substituer à r et à t pour intégrer de $u = o$ à $u = o$, si cette quantité n'était pas une différentielle exacte par rapport aux trois quantités r, t, u, qui varient avec la position du point M : or, on sait que pour que la valeur d'une intégrale soit ainsi indépendante des relations des variables qui y entrent, et reste toujours la même entre les mêmes limites, il faut qu'elle se présente sous la forme d'une différentielle exacte entre ces variables considérées comme indépendantes, ce qui ne peut avoir lieu ici à moins qu'on n'ait $k - 1 = n - k$ ou $k = \frac{1-n}{2}$. Telle est la relation que l'expérience démontre exister entre k et n; et comme nous avons déjà vu que k est négatif, il en résulte $n > 1$. Si l'on fait $n = 2$, on a $k = -\frac{1}{2}$.

§ 30. On peut prouver directement par expé-

rience, que la valeur de n est plus grande que l'unité, et que, par conséquent, le coefficient k est négatif. Cette expérience consiste à soumettre un cercle à l'action d'un conducteur rectiligne situé dans le même plan. Soit mp (fig. 29, pl. III), le conducteur rectiligne, prenons sur ce conducteur un élément quelconque; si du milieu de cet élément m, on mène deux lignes très rapprochées mac et mbd, elles intercepteront sur le cercle deux portions très petites ab et cd, telles que l'on aura $ab : cd :: am : cm$; de plus, en comparant les angles de cette figure avec ceux que nous avons appelés α, β et γ dans la formule des actions électro-dynamiques, on a pour ab,

$$\gamma = 0,\ \beta = amp,\ \alpha = cab;$$

pour cd, $\gamma' = 0$, $\beta' = amp = \beta$, $\alpha' = dcf = 180° - \alpha$;

de plus ab est dans le sens du courant et cd en sens contraire; donc si l'on prend le premier positivement, il faut prendre le second négativement. Cela posé, l'action de ab sur m sera

$$\frac{ii'ab\ (\sin\alpha \sin\beta + k \cos\alpha \cos\beta)}{ma^n};$$

l'action de cd sera

$$\frac{ii'cd\ (\sin\alpha \sin\beta - k \cos\alpha \cos\beta)}{mc^n}$$

Si l'on prend un second élément du conducteur

rectiligne à une distance $pm' = mp$ du pied de la perpendiculaire abaissée du centre du cercle, et si l'on mène des lignes $m'd'$, $m'c'$ qui déterminent sur le cercle deux élémens symétriques par rapport à ab et cd, on aura pour ces nouveaux élémens les mêmes angles excepté $\mathcal{C}$ qui descendra $180^\circ - \mathcal{C}$, par conséquent l'action de $a'b'$ sera

$$ab \frac{(\sin \alpha \sin \beta - k \cos \alpha \cos \beta)}{am^n},$$

celle de $c'd'$,

$$-\frac{cd(\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta)}{cm^n};$$

la somme des forces exercées par les quatre élémens sera

$$2 \sin \alpha \sin \beta \left\{ \frac{ab}{am^n} - \frac{cd}{cm^n} \right\}.$$

La forme de cette valeur montre que les deux actions des parties antérieures et postérieures sont toujours opposées, mais leurs grandeurs re-relatives varient selon les suppositions que l'on fait sur n; en effet, on peut les mettre isolément sous la forme

$$2 \sin \alpha \sin \beta \times \frac{ab}{am^n} \text{ et } 2 \sin \alpha \sin \beta \times \frac{cd}{cm^n}.$$

Lorsque $n = 1$, les deux valeurs sont égales d'après la proportion $ab : cd : am : cm$; si $n > 1$ $\frac{cd}{mc^n} < \frac{ab}{am^n}$,

l'action de *ab* est plus grande que celle de *cd*. Si au contraire $n < 1$, il en résulte $\frac{cd}{mc^n} > \frac{ab}{am^n}$, et l'action de *cd* l'emporte sur celle de *ab*.

Pour comparer ces résultats avec l'expérience, on se sert du conducteur astatique (fig. 30), composé de deux cercles parcourus en sens contraires; on le suspend dans les coupes y et y', on met le conducteur (fig. 4) dans les coupes i, h, on amène l'un des cercles $\beta\gamma\delta$, par exemple, près de la partie rectiligne de hi, et l'on voit que si les courans sont dirigés de la même manière dans le conducteur rectiligne et dans la partie du cercle la plus voisine, le conducteur mobile est attiré, et qu'il est repoussé dans le cas contraire. Ainsi, le genre d'action est toujours déterminé par la partie antérieure du cercle, et nous avons vu que ce phénomène donne $n > 1$.

§ 31. On peut donner à la formule qui exprime l'action mutuelle de deux élémens une forme plus simple, qui sépare les deux intégrations; en effet, on a démontré que $\cos \beta = -\frac{d'r}{ds'}$, ou $d'r = -\cos \beta \, ds'$; en reportant cette valeur dans l'expression $-ghr^k d(r^k d'r)$, on a

$$-ii'r^k d(-r^k \cos \beta ds') = ii'r^k d(r^k \cos \beta ds');$$

lorsque l'on calcule l'action d'un courant d'une forme quelconque sur un élément ds', cette der-

nière quantité doit être regardée comme constante ; on peut la sortir de dessous le signe d, et écrire $ii'ds'r^k d\,(r^k \cos \mathcal{C})$, le calcul revient alors à déterminer les valeurs de r et de $\cos \mathcal{C}$ pour un élément quelconque du courant donné, décomposer la force qui s'exerce dans la ligne qui joint deux élémens en trois forces parallèles à des axes rectangulaires pris arbitrairement, intégrer les expressions de chacune de ces forces dans les limites qui conviennent pour chaque cas particulier à la forme et à la position de la courbe suivie par le courant, et réunir les trois systèmes en une seule force, d'après les lois de la Mécanique.

M. Ampère a d'abord déduit de sa formule un résultat remarquable, qu'il a obtenu en décomposant la force dans la direction même de l'élément ds', ce qui se fait en la multipliant par $\cos \mathcal{C}$; on a ainsi $ii'\,ds'\,r^k \cos \mathcal{C}\, d(r^k \cos \mathcal{C})$, dont l'intégrale est

$$\frac{ii'ds'}{2}(r^{2k} \cos^2 \mathcal{C} + c),$$

qu'il faut prendre entre les deux limites marquées par les extrémités du conducteur suivi par le courant. Si ce conducteur forme un circuit complètement fermé, les valeurs de r et de $\cos \mathcal{C}$ seront les mêmes aux deux limites, puisque ces limites se trouveront au même point, et l'intégrale se trouvera par conséquent nulle, d'où

il suit que la résultante de toutes les actions exercées par un circuit fermé sur une petite portion de conducteur est toujours perpendiculaire à la direction de cette petite portion; il en doit être de même d'un assemblage quelconque de circuits fermés.

§ 32. Les calculs ont été étendus à l'action mutuelle d'un conducteur rectiligne indéfini, et d'une très petite portion de courant située d'une manière quelconque dans l'espace, à l'action d'un courant indéfini, sur un conducteur circulaire, de deux courans circulaires l'un sur l'autre, enfin, aux actions exercées par certaines combinaisons de courans circulaires sur un petit courant élémentaire, sur un courant rectiligne indéfini, et sur d'autres systèmes de courans circulaires. Toutes les combinaisons de courans circulaires que l'on a soumises aux calculs, sont des cylindres droits et des surfaces annulaires, qui ont pour axes des lignes planes quelconques. Je me bornerai à donner ici l'extrait de deux Mémoires sur ce sujet, lus à l'Académie des Sciences le 3 février 1823, l'un par M. Savary et l'autre par moi. Je mettrai les différens théorèmes dans leur ordre rationnel: les lettres initiales S et D indiqueront de quel Mémoire chacun d'eux est tiré.

1°. L'action d'un conducteur rectiligne indéfini dans les deux sens, sur un petit courant situé

d'une manière quelconque dans l'espace, est perpendiculaire à ce petit courant. (D.)

2°. Lorsqu'un courant qui suit une courbe plane quelconque est soumis à l'action d'un courant indéfini dans les deux sens, et se meut autour d'un axe perpendiculaire au plan de la courbe, et à la direction du courant indéfini, le moment des forces qui sollicitent le conducteur est le même dans toutes les positions.... (D.)

3°. Quand un courant électrique suit une courbe symétrique par rapport à un axe, l'action de cette courbe sur un courant indéfini, parallèle à son plan, et perpendiculaire à l'axe, est perpendiculaire au courant indéfini. Le cercle jouit de cette propriété, puisqu'il est symétrique par rapport à tous ses diamètres.... (D.)

4°. L'action d'un petit cercle sur un courant indéfini, parallèle à son plan, est, pour son intensité, indépendante des positions relatives du cercle et du courant : elle est proportionnelle à la surface du cercle, et en raison inverse du carré de la distance. L'angle formé par la direction de cette force avec le plan du cercle est toujours double de l'angle que forme avec le même plan la perpendiculaire abaissée du centre du cercle sur le conducteur indéfini..... (D.)

5°. L'action qu'exerce un conducteur rectiligne indéfini, situé dans un plan perpendicu-

laire à celui d'un courant circulaire, pour faire tourner ce courant autour de l'intersection des deux plans, est indépendante de l'inclinaison du conducteur rectiligne sur le plan du courant circulaire, et varie en raison inverse de sa distance au centre de ce dernier courant.... (S.)

6°. Un courant circulaire tend à faire mouvoir un fil conducteur indéfini parallèle à son plan, de manière que chacun des points de ce fil décrive une circonférence tangente au plan du courant circulaire, suivant le diamètre indéfiniment prolongé qui est parallèle au fil. La force varie en raison inverse du carré de la distance du fil au centre du courant circulaire..... (S.)

Parmi les combinaisons que l'on peut former avec des courans circulaires, la plus simple est celle qui se compose de plusieurs courans circulaires d'égal rayon, situés dans des plans perpendiculaires à la droite qui joint leurs centres. Cet assemblage, est ce que l'on nomme un *cylindre èlectro-dymamique*.

7°. L'action d'un cylindre électro-dynamique d'un très petit diamètre sur un élément de courant, se réduit à deux forces perpendiculaires à deux plans qui passent tous deux par cet élément, et chacun par l'une des extrémités de l'axe du cylindre. Chaque force est en raison inverse du carré de la distance de l'élément à l'une des extré-

mités de l'axe du cylindre, et proportionnelle au sinus de l'angle que la droite qui joint l'élément et cette extrémité fait avec la direction du même élément. D'où il suit que, si l'on suppose le cylindre électro-dynamique d'une longueur infinie, son action sur un élément de courant électrique ne dépend que de la position respective de l'élément et de l'extrémité du cylindre que l'on considère, mais nullement de la direction de l'axe du cylindre dans l'espace. Il en est de même de l'action du même cylindre sur un conducteur d'une forme et d'une grandeur quelconque. Cette action ne dépend que de la position de l'extrémité que l'on considère relativement au conducteur, et reste la même, quelle que soit la direction de l'axe du cylindre.... (S.)

8°. L'action d'un cylindre électro-dynamique, sur un conducteur indéfini perpendiculaire à son axe, se réduit à deux forces dirigées dans un même plan perpendiculairement aux lignes qui mesurent les distances du courant indéfini aux deux extrémités du cylindre, et en raison inverse de ces distances.... (S. D.)

9°. Si dans l'équateur d'une sphère, on conçoit un cercle d'un petit rayon dont le centre se confond avec celui de la sphère, et qu'un cylindre électro-dynamique très court soit transporté successivement sur tous les points de la surface, l'axe

du cylindre étant toujours dans le méridien, la tangente de l'angle formé par l'axe du cylindre et le plan tangent à la sphère, est double de la tangente de la latitude du point que l'on considère.... (S.)

10°. L'action mutuelle de deux cylindres électro-dynamiques, peut toujours être représentée par quatre forces, deux attractives et deux répulsives, agissant en raison inverse du carré de la distance, et dirigées suivant les lignes qui joignent les deux extrémités d'un cylindre aux deux extrémités de l'autre.... (S.)

En réunissant plusieurs cercles dans des plans perpendiculaires à une même courbe plane qui réunit tous les centres, on forme des *surfaces annulaires électro-dynamiques*.

11°. L'action exercée sur un conducteur indéfini, par une surface annulaire dont l'axe est une courbe plane quelconque symétrique par rapport à un diamètre, est dirigée dans ce diamètre toutes les fois que le courant indéfini passe par un point de cette ligne, et est perpendiculaire au plan de l'axe de la surface.... (D.)

12°. Un anneau de petits courans électriques circulaires, est sans action à toute distance sur un conducteur indéfini perpendiculaire au plan de l'anneau.... (D.)

13°. Un anneau de courans électriques circu-

laires, est sans action sur un conducteur voltaïque de forme quelconque.

14°. L'action mutuelle de deux cylindres électro-dynamiques peut être représentée par quatre forces dirigées suivant les lignes qui joignent les deux extrémités du premier aux deux extrémités du second, et dont les intensités sont en raison inverse des carrés de ces lignes.

§ 33. M. Savary a conclu du théorème 13°., un moyen de déterminer la valeur de la constante k, qui reste indéterminée dans la formule; en effet, il a prouvé que ce théorème n'était vrai que sous la relation $kn+1=0$. M. Ampère avait déduit d'un autre cas d'équilibre (§ 29). . . . . $2k+n-1=0$. Les deux équations fournissent deux systèmes de valeurs

$$\begin{Bmatrix} k=1 \\ n=-1 \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} k=-\frac{1}{2} \\ n=2 \end{Bmatrix};$$

et comme M. Ampère a prouvé par diverses expériences, entre autres par la répulsion des parties d'un même courant, que k est négatif; que d'ailleurs tous les phénomènes s'accordent à montrer que la force décroît avec la distance, les valeurs $k=-\frac{1}{2}$, $n=2$ sont seules admissibles. Il suffisait donc de vérifier expérimentalement le théorème énoncé pour démontrer que telle était réellement la valeur de k. A cet effet, M. Ampère a fait tourner en hélice un fil de cuivre, revêtu

de soie, sur une autre portion du même fil, de manière que le courant électrique de cette dernière portion, détruisît l'effet des projections longitudinales des spires de la première; on formait avec cette hélice un anneau circulaire composé de plusieurs tours de la même hélice, et les deux extrémités du fil, tordues ensemble pour se neutraliser mutuellement, se séparaient à une assez grande distance de l'anneau, et communiquaient avec les deux extrémités d'une pile de Volta. Cet appareil, présenté successivement à des conducteurs de différentes formes, n'a jamais exercé aucune action sur eux, quoique la pile produisît, avec beaucoup d'intensité, tous les autres phénomènes électro-dynamiques.

§ 34. Le théorème 8°. fournit une construction simple pour la résultante des forces que l'on y considère; elle est dirigée suivant le diamètre du cercle qui passe par le pied du courant indéfini et par les deux extrémités du cylindre électro-dynamique.... (S.)

En effet, si l'on décompose une force appliquée au point M, et dirigée suivant MG, en deux autres perpendiculaires aux lignes MB et MA, les composantes seront entre elles comme

$$\cos AMG : \cos BMG \text{ ou } :: \sin MGE' : \sin MGD\,;$$

or, on a dans le triangle EMG,

$$ME = MG \sin EGM\,;$$

dans le triangle MGD,

$$MD = MG \sin MGD;$$

donc

$$\sin MGE : \sin MGD :: ME : MD :: MA : MB.$$

C'est-à-dire que les deux composantes seront en raison inverse des lignes MA et MB, comme l'exige le théorème énoncé. Si l'on prolonge le diamètre MG jusqu'au point N, et que l'on joigne NA, NB, ces lignes seront respectivement perpendiculaires aux droites MA et MB; d'où résulte une construction plus simple qui a été donnée par M. Ampère: elle consiste à joindre le point M avec les deux extrémités du cylindre, et par ces deux points mener les perpendiculaires NA et NB; la ligne MN qui passe par le point donné et par le point de rencontre des deux perpendiculaires, est la direction de la résultante.

Lorsque le point M est situé sur la circonférence dont AB est le diamètre, la résultante passe par le point C, milieu de l'axe du cylindre. Cette circonférence limite jouit ainsi de la propriété que, de tous ces points, le fil conducteur n'exerce aucune action pour faire tourner le cylindre autour du milieu de son axe; en sorte que, si d'un point intérieur quelconque, ce fil repousse la moitié du cylindre dont il est le plus près, il l'attirera de tous les points extérieurs, et réciproquement.

Lorsqu'on suppose que le fil situé en dehors de la circonférence limite repousse la portion du cylindre la plus voisine, ce cylindre se trouve dans un état d'équilibre stable, quand son axe est perpendiculaire au plan qui passe par son milieu et par le fil : car, alors les deux forces perpendiculaires aux lignes qui joignent le pied du fil et les extrémités du cylindre, sont dirigées dans une même ligne. C'est alors seulement qu'en faisant osciller le cylindre supposé horizontal autour de cette position d'équilibre, et plaçant le fil vertical de plus en plus loin du centre de suspension, la force diminue en raison inverse de la distance.

Lorsque cette distance est fort grande par rapport à la longueur du cylindre mobile, si l'on plie le fil indéfini de manière que les deux moitiés s'inclinent également de part et d'autre du plan horizontal en formant un angle dont le sommet se trouve dans ce plan, chacune d'elles exerce évidemment la même action pour faire osciller le cylindre; et, d'après le calcul de M. Savary, lorsqu'on regarde la longueur de ce cylindre comme infiniment petite relativement à sa distance au sommet de l'angle, l'action totale est à celle du fil vertical et indéfini, dans le rapport de la tangente de la moitié de l'angle d'inclinaison à l'unité.

Enfin, M. Savary a calculé l'action d'un cylin-

dre électro-dynamique, pour faire tourner un fil conducteur mobile autour d'un axe vertical passant par l'extrémité supérieure de ce fil, dans le cas où le cylindre est très long et où une de ses extrémités se trouve dans l'axe de rotation au niveau de l'extrémité inférieure du conducteur mobile, action qui, d'après ce que nous avons déjà dit, est indépendante de la direction de l'axe du cylindre, et il a trouvé qu'elle est alors en raison inverse du rayon du cercle décrit par cette même extrémité inférieure du conducteur mobile.

En général, l'action du cylindre électro-dynamique sur un conducteur indéfini, tend à faire décrire un cercle à ce dernier. Ce résultat a été obtenu par M. Ampère : soient abaissées les lignes MP et NQ perpendiculaires à AB; MO perpendiculaire à MN et OT tangente au cercle ATB. Faisons $CP = x$, $PM = y$, $CQ = t$, $QN = u$, $CA = CB = r$, les triangles semblables MPA, ANQ donnent

$$y : x - r :: t + r : u,$$

et les triangles semblables BNQ, BMP

$$y : x + r :: t - r : u;$$

d'où,

$$(x - r)(t + r) = (x + r)(t - r), xt - rt + rx - r^2$$
$$= xt - rx + rt - r^2;$$

d'où
$$2r(x - t) = 0,$$

$$x = t, u = \frac{x^2 - r^2}{y}.$$

Cela posé, le triangle MPO donne

$$MO = \sqrt{y^2 + PO^2}:$$

à cause de la similitude des triangles MPO et RMN, on a

$$MR : RN :: MP : PO;$$

ou $\quad 2x : u-y :: y : PO = \frac{uy-y^2}{2x} = \frac{x^2-r^2-y^2}{2x};$

reportant cette valeur dans celle de MO, il vient successivement

$$MO = \sqrt{y^2 + \frac{(x^2-r^2-y^2)^2}{4x^2}} = \frac{1}{2x}\sqrt{(x^2-r^2-y^2)^2+4x^2y^2},$$

$$MO = \frac{1}{2x}\sqrt{(x^2+r^2+y^2)^2-4r^2x^2} = \sqrt{\left(\frac{x^2+r^2+y^2}{2x}\right)^2 - r^2};$$

d'une autre part on a $CO = CP - PO$, ou

$$CO = x - \frac{x^2-r^2-y^2}{2x} = \frac{x^2+r^2+y^2}{2x};$$

donc

$$MO = \sqrt{CO^2 - r^2} = AT.$$

Ce dernier résultat montre que pour tous les points situés à même distance du point O, les perpendiculaires à la résultante se rencontrent sur l'axe AB du cylindre en ce point, c'est-à-dire que le point M tend à décrire un cercle dont le centre est situé sur l'axe du cylindre, à une distance du point C, déterminée par la formule

$$CO = \frac{y^2+x^2+r^2}{2x},$$

Si l'on suppose $x = o$, la valeur de CO devient infinie, c'est-à-dire que le point M tend alors à se mouvoir suivant la perpendiculaire à AB, menée par le point C; ainsi pour tous les points situés sur cette perpendiculaire, le mouvement de rotation se change en un mouvement rectiligne, comme si le point M était attiré ou repoussé par le milieu du cylindre. Cette concentration apparente des forces au centre du cylindre a encore lieu toutes les fois que le pied M′ (fig. 33) du courant indéfini est situé sur un des points de la circonférence ATB, car si l'on applique à ce cas la construction qui donne MN (fig. 31), le point N tombe évidemment sur une partie de la circonférence diamétralement opposée à M′ (fig. 33), et la direction de la force passe par le centre C, comme on l'a déjà vu.

§ 35. Si le conducteur indéfini qui se projette en M était assujetti à tourner autour d'un axe parallèle à sa direction, et dont je supposerai, pour simplifier, que la projection tombe sur la ligne AB, au point F (fig. 32), la composante de MN suivant la direction FM serait détruite par le mode de suspension, il ne resterait que la composante perpendiculaire à FM; pour la trouver, il faut multiplier respectivement les deux forces $\frac{A}{AM}$ et $\frac{A}{MB}$, dirigées suivant les perpendiculaires à MA et MB, par les cosinus des angles FMA et FMB;

or en faisant $FM = b$, $CF = c$, angle $MFC = \varphi$, $MA = d$, $MB = d'$, on a

$$\cos FMA = \frac{b^2 + d^2 - (c-a)^2}{2bd},$$

$$\cos FMB = \frac{b^2 + d'^2 - (c+a)^2}{2bd'};$$

et pour les deux composantes,

$$A \times \frac{b^2 + d^2 - (c-a)^2}{2bd^2} \text{ et } A \times \frac{b^2 + d'^2 - (c+a)^2}{2bd'^2};$$

ces deux forces tendant toujours à faire tourner en sens contraires, leur résultante est égale à leur différence, c'est-à-dire, à

$$\frac{A}{2b}\left\{\frac{d'^2[b^2 + d^2 - (c-a)^2] - d^2[b^2 + d'^2 - (c+a)^2]}{d^2 d'^2}\right\};$$

en mettant pour d'^2 et d^2 leurs valeurs

$$d^2 = b^2 + (c-a)^2 - 2b(c-a)\cos\varphi,$$

$$d'^2 = b^2 + (a+c)^2 - 2b(a+c)\cos\varphi,$$

cette expression devient

$$\frac{c+a)^2 - 2b(c+a)\cos\varphi][2b^2 - 2b(c-a)\cos\varphi] - [b^2 + (c-a)^2 - 2b(c-a)\cos\varphi][2b^2 - 2b(c+a)\cos\varphi]}{d^2 d'^2}\Bigg\}$$

$$= 2Aa\frac{[2bc + (b^2 + c^2 - a^2)\cos\varphi]}{(b^2 + c^2 + a^2 - 2bc\cos\varphi)^2 - 4a^2(c - b\cos\varphi)^2}.$$

Dans cette formule, si l'on suppose $c = 0$, c'est-à-dire, si l'axe de rotation passe par le centre du cylindre, on a

$$2Aa\frac{(b^2 - a^2)\cos\varphi}{(a^2 + b^2)^2 - 4a^2b^2\cos^2\varphi},$$

qui devient égal à zéro lorsque $\varphi=\frac{\pi}{2}$, et qui change de signe avec le cosinus ; donc le courant indéfini est alors amené dans la position où le rayon vecteur CM est perpendiculaire à AB. Si l'on donne à C une valeur quelconque, la formule indique encore une position d'équilibre qui correspond à $\cos\varphi=\frac{2bc}{b^2+c^2-a^2}$; cette position d'équilibre n'existe réellement que dans le cas où l'on a

$$2bc<b^2+c^2-a^2,\ a^2<b^2+c^2-2bc;\ a<c-b,$$

$$\text{ou } 2bc<a^2-b^2-c^2,\ a^2>b^2+c^2+2bc,\ a>b+c.$$

En d'autres termes, le courant indéfini prend une position d'équilibre toutes les fois que les deux extrémités du cylindre sont en dehors du cercle décrit par le point M; cette position d'équilibre fait avec l'axe du cylindre un angle d'autant plus grand, que la différence entre a^2 et $(c-b)^2$, ou $(c+b)^2$ est plus grande. Elle se trouve toujours dans la demi-circonférence la plus voisine de A. Si $a=c-b$, ou $c+b$, $\cos\theta=\pm 1$, le point M vient se confondre avec le point A. Dans cette position, si l'on approche, et si l'on éloigne successivement le cylindre de l'axe de rotation projeté en F, la force qui sollicite le point M devient positive dans le premier cas, qui donne $2bc>b^2+c^2-a^2$, négative, dans le

second, qui donne $2bc<b^2+c^2-a^2$. Nous avons vu que le courant indéfini tournant autour du point F, reste en équilibre lorsque son pied M se confond avec l'extrémité du cylindre A. Ce résultat est une conséquence de ce que la force qui sollicite le point M, est alors dirigée suivant AB; il en serait de même si le point M, tombant sur un quelconque M′ des points de la circonférence AT′B, était mobile autour d'un axe qui rencontrerait le rayon CM′, par exemple, autour d'un axe qui se projetterait en F′, (fig. 33); car nous avons vu que pour tout courant indéfini dont le pied tombe sur cette circonférence, la résultante est dirigée dans le rayon, et il est évident qu'une pareille force sera détruite par la résistance de l'axe fixe F′. D'où il suit que si le courant indéfini mobile était en équilibre au point A, l'équilibre ne sera point troublé quand on fera tourner le cylindre AB autour de son centre.

Lorsque a est plus petit que $c-b$, ou plus grand que $c+b$, c'est-à-dire, quand l'une des extrémités du cylindre est en dedans et l'autre en dehors du cercle décrit par le pied du courant indéfini, il n'y a plus de position d'équilibre, le conducteur indéfini tourne continuellement dans le même sens avec une intensité variable, mais qui produit bientôt un mouvement uniforme dans la pratique, à cause de la résistance des

liquides par lesquels les communications sont établies.

En résumé, l'action d'un cylindre droit, sur un courant indéfini perpendiculaire à son axe, et assujetti à tourner autour d'un point fixe, pris sur l'axe du cylindre, produit un mouvement continu de rotation, lorsque l'une des extrémités du cylindre est en dedans et l'autre en dehors du cercle décrit par le pied du courant indéfini. La même action amène le courant indéfini dans une position fixe d'équilibre, lorsque les extrémités du cylindre sont toutes deux en dedans ou toutes deux en dehors du même cercle... (D.)

TROISIÈME PARTIE.

§ 36. Non-seulement les courans voltaïques exercent les uns sur les autres des forces attractives et répulsives, d'où nous avons vu résulter les mouvemens oscillatoires ou continus des conducteurs mobiles, mais encore ils éprouvent de la part de la terre une influence dont nous allons suivre les effets.

Un courant horizontal, fixé par une de ses extrémités, tourne par l'action de la terre, toujours dans le même sens; le mouvement de rotation a lieu de l'est à l'ouest par le midi, si le courant va de la circonférence au centre, et de l'ouest à l'est par le midi, si le courant va du centre à la circonférence.

On se sert pour cette expérience du conducteur (fig. 10); on le pose par sa pointe dans la coupe S, on fait plonger le cercle $\alpha\beta\gamma$ dans l'eau acidulée, et on établit le courant dans l'ordre suivant, $r\mathrm{R}put\mathrm{S}aqq'\mathrm{KQO}ar'$; il va de la circonférence

au centre dans αS, et l'appareil tourne de l'est à l'ouest par le midi; ce mouvement se continue toujours dans le même sens tant que les communications restent établies. Si l'on change de place les deux rhéophores, le courant va du centre à la circonférence dans Sα, et le mouvement de rotation s'établit en sens contraire, c'est-à-dire de l'ouest à l'est, par le midi.

§ 37. Dans ce mouvement continu de révolution, le moment de rotation est toujours le même. On le prouve en plaçant l'un au-dessus de l'autre deux vases de cuivre, semblables à LMN (fig. 1), et les faisant communiquer par un conducteur composé d'une branche verticale située dans l'axe des deux vases, et de deux branches horizontales, portant des cercles de cuivre, comme l'appareil (fig. 10). Dans cette disposition, si le courant va de la circonférence au centre dans le vase supérieur, et descend dans l'axe vertical, il ira ensuite du centre à la circonférence dans le vase inférieur. Alors quel que soit l'angle que les deux branches horizontales font entre elles, l'appareil reste en repos : ce qui prouve que la tendance de la branche supérieure pour tourner de l'est à l'ouest, est contre-balancée par la tendance opposée de la branche inférieure : et puisque cet effet a lieu pour tous les angles possibles, on en peut conclure que le mouvement a lieu avec une intensité constante

dans tous les azimuths. Cette expérience ne peut pas se faire avec l'appareil (fig. 1).

§ 38. *Un courant vertical mobile autour d'un axe vertical se dirige, par l'influence de la terre, à l'ouest, quand il est ascendant, et à l'est quand il est descendant.*

Soient $\alpha\beta$ (fig. 34) le courant vertical, αl et $\beta\gamma$ les deux branches horizontales qui le réunissent à l'axe de rotation, δ un contre-poids destiné à faire équilibre au demi-rectangle $l\alpha\beta\gamma$; on met l'extrémité inférieure l dans la coupe l (fig. 1), et la pointe z dans la coupe de même nom, placée au-dessus de l, et dans la même verticale; on établit les communications en plaçant le rhéophore positif dans r, le tourniquet dans a, et le rhéophore négatif dans r', le courant suit les conducteurs dans l'ordre rRR$'l'l\alpha\beta\gamma zz'TOar'$. Il est ascendant dans $\alpha\beta$; la terre exerce sur les deux courans horizontaux $l\alpha$ et $\beta\gamma$ des actions égales et opposées; il ne reste donc plus que l'action de la terre sur la ligne verticale $\alpha\beta$. L'expérience montre que cette force dirige le conducteur vers l'ouest. Si l'on change de place les deux rhéophores, le courant devient descendant dans $\alpha\beta$, et le conducteur se retourne à l'est, ce qui prouve en même temps que les mouvemens ne sont pas dus aux forces qui émanent des deux courans fixes R$'$R$''$ et z'T.

La mobilité de la tige recourbée $z\xi z'$ permet de la tourner, dans chaque cas, de manière à ne pas gêner les mouvemens du conducteur.

§ 39. *Un courant horizontal, équilibré par un contre-poids, et suspendu de manière à tourner autour d'un axe horizontal, est dérangé de sa position verticale par l'action de la terre.*

Pour exprimer le sens de ce dérangement, il faut généraliser et appliquer à l'espace qui environne les courans électriques, les dénominations usitées pour les bords d'une rivière. On suppose, dans ce cas, un homme placé dans le courant, la figure tournée du côté d'aval, et on appelle la rive à sa droite, la droite de la rivière, et le bord situé à sa gauche, la gauche de la rivière. Pour appliquer cette même idée aux courans électriques, il faut concevoir un homme couché dans le courant, la tête vers la pointe de la flèche qui en marque la direction, et la figure tournée du côté de la terre, et alors le fait dont il s'agit peut s'exprimer ainsi.

Un courant horizontal suspendu et maintenu en équilibre par un contre-poids, de manière à tourner librement autour d'une droite horizontale, est dérangé de sa position par l'influence de la terre, il se relève vers sa gauche. Ce phénomène a lieu dans tous les azimuths possibles.

Un conducteur horizontal $\delta\varepsilon$ (fig. 35) est sus-

pendu par les deux branches recourbées $\delta\gamma\alpha i$ et $\varepsilon\eta\beta i'$, dans les deux coupes i et i' (fig. 1), placés sur une même horizontale. Il est équilibré par un contre-poids μ, attaché à un tube de verre qui réunit les deux montans $\delta\gamma\alpha$ et $\varepsilon\eta\beta$; l'une des coupes i' est en communication métallique avec la colonne $T'y'$ par l'intermédiaire de la coupe x' qui pose sur cette colonne, et peut tourner à volonté dans tous les sens. La seconde coupe i est soudée à l'extrémité d'un conducteur métallique ix terminé par une pointe qui plonge dans la coupe x soudée à la colonne centrale Ty. Les deux conducteurs $i'x'$ et ix sont attachés à un même axe isolant $x'x$; de cette manière on peut, en tournant la coupe supérieure x', amener la ligne horizontale ii', et par suite le conducteur $\delta\varepsilon$ dans tous les azimuths. Ce mouvement n'est limité que par l'épaisseur des deux colonnes. En établissant les communications dans l'ordre suivant, $r'T'x'i'\beta\eta\varepsilon\delta\gamma\alpha ixTQ$, la terre exercera sur les deux portions verticales $\gamma\delta$, $\varepsilon\eta$, des actions égales et contraires qui se feront, par conséquent, équilibre; il ne restera que les effets produits sur les deux horizontales $\delta\varepsilon$ et $\eta\beta\alpha\gamma$. Ces deux actions sont contraires; mais $\delta\varepsilon$ étant plus long que la somme des deux lignes $\eta\beta$ et $\alpha\gamma$, et agissant par un bras de levier beaucoup plus grand, les phénomènes seront tels qu'on les observerait sur $\delta\varepsilon$ seul,

mais avec une intensité un peu moindre. Or, on voit que le plan est dérangé de sa position verticale dans tous les azimuths ; ainsi, quand le courant $\delta\varepsilon$ va du sud au nord, il se relève à l'ouest, du nord au sud, à l'est ; quand il va de l'est à l'ouest, il se relève au sud ; et de l'ouest à l'est, il se dévie vers le nord, ce que l'on peut énoncer comme nous l'avons fait, en disant qu'il se dévie toujours à sa gauche.

§ 40. *Un courant qui suit une courbe fermée suspendue de manière à tourner autour de la verticale qui passe par son centre de gravité prend une direction fixe par l'action de la terre; elle devient à peu près parallèle à l'équateur, et le courant va de l'est à l'ouest dans la partie inférieure de la courbe.*

Pour soustraire cette courbe (fig. 36) à l'action des colonnes qui apportent l'électricité, et qui lui donnent une issue, il faut en faire les supports $y\alpha$ et $y'\delta$ assez longs, de manière que le cercle tombe tout près du niveau de la table. On met les deux pointes y' et y dans les coupes de même nom (fig. 1), et on établit les communications comme il suit : $r'T'y'\alpha\beta\gamma\delta yTQ$; le cercle tourne alors, et après quelques oscillations, se fixe, la partie $\alpha\beta$ à l'est, et $\gamma\delta$ à l'ouest ; en changeant les rhéophores de place, l'appareil se retourne, et, après quelques oscillations, s'arrête

dans la position opposée à la précédente. Si ce conducteur était absolument libre, il pourrait passer d'une des positions à l'autre en tournant indifféremment d'un côté ou de l'autre ; mais dans l'appareil, il ne peut achever sa demi-révolution qu'autant qu'elle s'opère dans le sens où les deux branches verticales ne sont pas arrêtées par les deux colonnes qui les soutiennent.

§ 41. Ce qui se présente de plus simple pour expliquer les phénomènes précédens sans multiplier les agens naturels, c'est de concevoir qu'il existe à la surface ou dans l'intérieur du globe, des courans électriques qui agissent sur les conducteurs voltaïques, d'après les lois que nous avons reconnues dans les deux premiers chapitres. Pour produire la rotation continue qu'on observe dans un courant horizontal (§ 36), la terre agit comme un courant tangent à l'horizon ; mais cette expérience ne suffit pas pour déterminer complètement la position du courant terrestre, car le phénomène serait produit également par un courant situé au midi et allant de l'est à l'ouest, ou à l'ouest allant du sud au nord, ou par un courant qui serait au nord du lieu de l'observation et qui marcherait de l'ouest à l'est, ou enfin par un courant qui, placé à l'est, irait du nord au sud. En général tous les courans tangens à l'horizon satisferaient également à la condition de faire tour-

ner un courant horizontal fixe par une de ses extrémités, comme nous avons vu que la terre le fait tourner. Le second fait (§ 38), qui consiste dans la direction d'un courant vertical, détermine la position du courant terrestre ; en effet, lorsqu'un courant vertical est descendant, il va en s'approchant du globe et doit rétrograder sur le courant fixe ; quand il est ascendant, il s'éloigne du courant terrestre, et doit se transporter dans le même sens que l'électricité de ce courant : or, dans le premier cas, il se porte vers l'est, et dans le second vers l'ouest, d'où il résulte que la direction du courant terrestre est de l'est à l'ouest. Les mêmes effets peuvent évidemment être produits par plusieurs courans à peu près parallèles à l'équateur et dirigés tous de l'est à l'ouest. Si donc l'action de la terre sur les courans voltaïques, est de la même nature que celle que ces courans exercent les uns sur les autres, il doit exister à la surface ou dans l'intérieur du globe, un ou plusieurs courans électriques dirigés à peu près de l'est à l'ouest, et situés au sud pour toute l'Europe, car toutes les expériences faites en Angleterre, en Italie, à Genève, en France et en Allemagne, ont conduit aux mêmes résultats.

§ 42. Pour apprécier le degré de probabilité de cette hypothèse, il faut d'abord examiner si elle s'accorde avec les deux autres faits déjà décrits.

(§ 39 et 40), et en suivre les conséquences pour les vérifier ensuite expérimentalement. Je remarquerai d'abord qu'en observant attentivement la direction des conducteurs verticaux, on reconnaît qu'ils ne se dirigent pas exactement de l'est à l'ouest, mais que le plan de leur position d'équilibre, fait avec la perpendiculaire à la méridienne, un angle qui est à Paris de 20° à 25°; dans l'expérience du § 39, un courant horizontal est attiré au sud ou repoussé vers le nord, lorsqu'il est parallèle au plan que nous venons de déterminer, attiré quand il va de l'est à l'ouest, repoussé dans le cas contraire, et ces résultats sont parfaitement conformes à ceux que produirait un courant situé au sud du lieu de l'observation et dirigé de l'est à l'ouest. Pour les positions intermédiaires, tout ce que l'on sait *à priori*, c'est qu'en renversant le sens du courant horizontal, on change constamment l'attraction en une répulsion égale et contraire, ou réciproquement; mais le calcul va plus loin. En effet, on a vu dans la partie mathématique de cet Essai (§ 31), que l'action d'un courant qui parcourt un cercle ou une ligne droite indéfinie, sur une autre portion de courant infiniment petite, est toujours perpendiculaire à cette dernière; d'où il résulte qu'un courant quelconque, soumis à l'action de la terre, sera constamment sollicité par des forces perpendiculaires à sa

direction, dans chacun de ces points, et qui devront être considérées comme parallèles entre elles, dans toute l'étendue du conducteur, à cause de la grande distance à laquelle se trouve placé le courant du globe.

§ 43. *Ainsi, un courant horizontal librement suspendu, ne doit prendre aucun mouvement dans le sens de sa longueur, mais se transporter parallèlement à lui-même de sa droite à sa gauche.*

L'appareil dont nous nous sommes servis ne peut pas manifester cette propriété, parce que le courant horizontal n'est pas libre de se mouvoir dans le sens de sa longueur, mais M. Faraday est parvenu expérimentalement à ce résultat; en suspendant à un fil de soie très long un fil métallique horizontal, dont les extrémités recourbées légèrement plongeaient chacune dans un baquet de mercure, il a vu ce fil s'avancer dans tous les azimuths comme s'il était tiré par des forces parallèles et égales dans toute sa longueur, et perpendiculaires à la direction du fil.

§ 44. La propriété de prendre tantôt un mouvement de rotation continu, et tantôt une position fixe d'équilibre, par l'influence de la terre, n'appartient pas uniquement aux courans horizontaux ou verticaux; un petit courant rectiligne, situé d'une manière quelconque dans l'espace, et sou-

mis à l'influence de la terre, est sollicité par une force perpendiculaire à sa direction ; si maintenant ce petit courant tourne autour d'un axe, il peut arriver deux cas; ou parmi ses diverses positions il y en aura une dans laquelle la direction de la force rencontrera l'axe de rotation, et alors le courant restera en équilibre; ou la direction de la force ne rencontrera jamais celle de l'axe de rotation, et le conducteur prendra un mouvement continu. Ce dernier cas est évidemment celui d'un conducteur horizontal, tournant autour d'un axe vertical (§ 36). Le premier est réalisé par un courant horizontal tournant autour d'un axe horizontal (§ 39), ou par un courant vertical, tournant autour d'un axe vertical, (§ 38).

§ 45. Nous avons vu (§ 40) qu'une courbe fermée, tournant autour d'un axe vertical, se dirige, par l'action de la terre, dans un plan qui fait avec la ligne est-ouest un angle de 20° à 25° pour Paris. Si l'on conçoit une ligne perpendiculaire au plan de la courbe, et se mouvant avec elle, sa direction dans l'état d'équilibre sera vers le nord, faisant avec la méridienne un angle d'environ 20 à 25°. Le plan dans lequel cette ligne vient ainsi se placer est déjà connu des physiciens par les expériences sur l'aiguille aimantée; on le nomme *méridien magnétique*. Avec cette dénomination on peut donner un énoncé plus exact du phéno-

mène, en disant : *Une courbe plane fermée mobile autour d'un axe vertical, et parcourue par l'électricité voltaïque, se dirige, sous l'influence du globe, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique.*

La direction que prend une courbe fermée est une conséquence directe de l'action exercée par la terre, sur un courant horizontal et sur un courant vertical. Pour plus de simplicité, remplaçons le cercle (fig. 36) par un rectangle (fig. 37), les deux branches horizontales $\varepsilon\beta$ et $\gamma\iota$, parcourues en sens contraire par le courant, tendent à tourner continuement, et dans des directions opposées, autour de l'axe de suspension ; et puisqu'elles sont égales et semblablement placées par rapport à l'axe de rotation, elles se feront équilibre ; reste l'action de la terre sur les deux lignes verticales $\beta\gamma$ et $\delta\varepsilon$; si d'abord le courant suit la direction $\beta\gamma\delta\varepsilon$, le conducteur descendant $\beta\gamma$ tend à se porter à l'est, et le conducteur ascendant $\delta\varepsilon$ à l'ouest ; si le courant parcourt les conducteurs dans l'ordre $\varepsilon\delta\gamma\beta$, c'est, au contraire, $\varepsilon\delta$ qui se porte à l'est, et $\gamma\beta$ à l'ouest. Dans les deux cas, les forces qui sollicitent ces deux branches verticales concourent à donner au système la direction observée dans laquelle le courant de la partie inférieure va de l'est à l'ouest.

Si maintenant on emploie un courant recourbé

d'une manière quelconque, on peut décomposer chacun de ses élémens en deux parties, l'une horizontale et l'autre verticale. Les parties horizontales tendront à produire un mouvement de rotation, soit dans un sens, soit dans un autre, suivant leur direction; mais pour toute courbe fermée, la somme des élémens horizontaux parcourus dans un sens, sera égale à la somme des élémens horizontaux parcourus en sens contraire; il y aura, par conséquent, équilibre dans cette partie du système, mais les courans verticaux tendront tous à prendre une position fixe d'équilibre. Pour déterminer ce qui en résultera, il faut distinguer deux cas : le premier est celui où la courbe, comme dans la fig. 36, tourne autour d'un axe qui la divise en deux parties; alors, comme nous l'avons expliqué sur le rectangle, les élémens verticaux situés de chaque côté de l'axe, concourent tous à amener la courbe dans la position où le courant de la partie inférieure va de l'est à l'ouest. Le second cas est celui où la courbe tourne autour d'un axe qui la laisse toute d'un même côté. Alors la branche verticale la plus éloignée de l'axe de rotation, agit par un plus grand bras de levier que la branche opposée, et détermine le mouvement du conducteur. Si donc elle est ascendante, le système se transporte à l'ouest de l'axe de rotation; si elle est descendante, le système est porté

à l'est : dans les deux cas, le courant de la partie inférieure va de l'est à l'ouest.

§ 46. Pour vérifier ces diverses conséquences, il est nécessaire d'augmenter l'influence de la terre sur les conducteurs que l'on emploie, car cette influence est toujours très faible. On peut atteindre ce but de plusieurs manières; par exemple, s'agit-il d'observer cette influence sur une courbe fermée verticale ? on pourra employer une spirale dont chaque tour équivaudra dans la pratique à une courbe fermée; les figures 38 et 39 représentent ces spirales assemblées par paires sur un tube de verre $\varepsilon\eta$, de manière qu'elles tendent à tourner dans le même sens par l'influence du globe, la première paire autour d'un axe pris dans le plan commun des deux spirales, la seconde autour d'un axe pris hors des plans des courbes. Ces deux conducteurs se suspendent successivement dans les coupes y et y' de la fig. 1, et en plaçant le rhéophore positif dans r', le tourniquet et le rhéophore négatif dans b, la direction du courant dans les deux appareils est $y'\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\eta\theta\iota\varkappa\lambda y$; le premier (fig. 38) se dirige, le point ε à l'est et η à l'ouest, pour le second, l'extrémité ε est au nord et η au sud. Dans l'un et dans l'autre, si l'on change le rhéophore de place, l'appareil se retourne et prend une position directement opposée à celle qu'il avait précédemment.

Dans la position d'équilibre de chaque système, le courant est dirigé de l'est à l'ouest pour la partie inférieure. On peut, en se servant des distinctions que nous avons établies sur la droite et la gauche des courans, exprimer le fait général de la dircetion des courbes fermées par l'énoncé suivant : *Un courant qui parcourt une courbe fermée, mobile autour d'un axe vertical, se dirige par l'action du globe de manière à avoir le pôle nord à sa gauche.*

§ 47. On peut encore accroître l'influence terrestre, en pliant le fil conducteur en hélice; dans ce cas chaque tour de l'hélice agit d'après la loi des projections, comme le feraient un cerle perpendiculaire à l'axe du cylindre, et un petit courant parallèle à l'axe et égal en longueur au pas de l'hélice; ainsi quel que soit ce pas, la courbe entière agira comme une série de cercles parallèles, en même nombre que les tours de l'hélice, et un courant rectiligne qui serait dans l'axe. En faisant revenir le fil conducteur dans l'axe, en sens contraire, son action détruit celle de tous les petits courans égaux au pas de l'hélice, et il ne reste qu'un appareil composé de cercles parallèles et parcourus dans un même sens; c'est ce que l'on nomme un *cylindre électro-dynamique*. Pour construire cet instrument de manière à le suspendre par son centre, on forme d'abord un crochet y'

(fig. 40) et une branche verticale $y'\alpha$; on tourne toujours dans le même sens depuis le point α jusqu'à l'extrémité β; on ramène le fil conducteur en $\beta\gamma$, et on recommence à tourner depuis γ jusqu'en δ, dans le même sens que pour la première moitié de l'hélice; enfin, on termine par un second crochet δy. Si l'on suspend ce conducteur dans les coupes y' et y (fig. 1), et qu'on établisse les communications comme dans les expériences précédentes, chaque spire tend à se diriger de manière que sa gauche regarde le nord; et, en vertu de cet effort, l'extrémité β se dirigera vers le nord et l'extrémité γ vers le sud; l'axe du cylindre faisant avec la méridienne du lieu, un angle d'environ 20° à 25°. Si l'on renverse l'ordre des communications, en changeant de place les deux rhéophores, l'extrémité β se dirige au sud et γ au nord, ce qui prouve que cette direction est bien due à l'influence du globe et non pas à l'action des diverses parties de l'appareil les unes sur les autres.

§ 48. Les deux extrémités du cylindre peuvent être considérées comme les pôles communs de tous les cercles qui le composent; on peut donc, sans rien changer à l'acception du mot *pôle* en Géométrie et en Astronomie, l'appliquer à ces deux extrémités, et les nommer les *pôles du cylindre électro-dynamique*. Alors pour les distinguer l'un

de l'autre, on remarquera que, par rapport aux courans terrestres, le pôle nord est à droite, puisque ces courans vont de l'est à l'ouest; si donc on veut nommer les deux pôles d'un cylindre électrique d'après leur analogie avec ceux de la terre, il faut appeler *pôle nord* ou *boréal du cylindre*, celui qui est situé à droite des courans héliçoïdes, c'est-à-dire le pôle qui se dirige au sud par l'action de la terre, et nommer, au contraire, *pôle sud* ou *austral du cylindre*, celui qui se dirige au nord, parce qu'il est à gauche des courans héliçoïdes, comme le pôle austral du globe est à gauche des courans terrestres.

§ 49. Si l'on construit une seconde hélice semblable (fig. 41), et qu'on la termine par deux fils de cuivre longs et flexibles $\alpha' r$ et $\delta' r'$, on pourra, après avoir fixé les deux extrémités des fils r et r' dans les deux coupes de même nom, amené le rhéophore positif dans r' et établi le reste des communications comme précédemment, présenter la seconde hélice à la première dans toutes les positions. D'abord si on les met l'une à la suite de l'autre, de manière que leurs pôles de noms différens se regardent, les cercles de ces deux hélices seront parallèles et parcourus dans le même sens; ils devront donc s'attirer. L'hélice (fig. 40) ne peut pas, d'après son mode de suspension, obéir à cette force; mais on conçoit que l'attrac-

tion aura encore lieu dans certaines limites, lorsqu'on présentera l'hélice (fig. 41) dans une position inclinée à l'axe de la première, ou quand les deux axes demeurant parallèles, ne seront plus exactement dans le prolongement l'un de l'autre. Au contraire, si les pôles de même nom se regardent, les deux hélices sont parcourues par l'électricité en sens contraire et se repoussent. L'expérience fait voir que le même mode d'action subsiste pour toutes les positions relatives des deux hélices, et les phénomènes se passent constamment comme si d'une hélice à l'autre il y avait répulsion entre les pôles de même nom, et attraction entre les pôles de noms contraires.

§ 50. M. Vanderheyden a donné une grande force directrice à une hélice en la composant d'un très grand nombre de tours; à cet effet, après avoir plié un fil de cuivre verni sur un cylindre de carton ou de toute autre matière, d'un bout à l'autre en ne laissant qu'un très petit intervalle entre les différentes spires, ce physicien recouvrait l'hélice ainsi obtenue avec une feuille de papier verni, ou de toute autre substance isolante, et roulait de nouveau le fil de cuivre toujours dans le même sens pour le ramener au point de départ. En enveloppant de même plusieurs hélices les unes sur les autres, il a donné une grande énergie à un système qui n'était animé

que par la force électro-motrice d'un seul élément composé d'une plaque de zinc et d'une plaque de cuivre attachées à un bouchon de liége, et portant à la partie supérieure du bouchon, chacune une pince en cuivre pour serrer les deux extrémités du conducteur en hélice.

Un élément de pile galvanique, suspendu ainsi à un bouchon et flottant sur de l'eau acidulée, peut servir de conducteur mobile dans un grand nombre d'expériences. M. de la Rive, qui a inventé cet instrument, lui a donné le nom d'*appareil flotteur*.

MM. de la Rive ont fait, avec l'appareil flotteur, un grand nombre d'expériences ingénieuses qui sont décrites ici avec d'autres procédés; ils ont démontré les premiers que la direction d'une courbe fermée par l'influence de la terre était uniquement due à l'action du globe terrestre sur les branches verticales de cette courbe.

QUATRIÈME PARTIE.

§ 51. QUAND on présente un aimant à une hélice mobile ou une hélice à une aiguille aimantée, on voit que les pôles de même nom dans l'hélice et dans l'aimant se repoussent, et que les pôles de noms contraires s'attirent. Ce phénomène indique une action mutuelle entre les conducteurs et les aimans. Le reste de cet Ouvrage sera consacré aux lois de ce nouveau genre d'action que nous commencerons par produire dans toute sa simplicité en employant un courant rectiligne. Pour fixer les positions respectives du fil et de l'aimant, je supposerai que l'homme que nous avons imaginé couché dans le courant, quand il a fallu en fixer la direction relativement à la terre, regarde toujours l'aiguille aimantée; dans cette position la droite du courant est toute la partie de l'espace à droite de cet être fictif, et la gauche toute la partie opposée.

§ 52. *Un conducteur rectiligne mobile soumis à l'action d'un aimant, se tourne perpendiculairement à l'aimant, de manière que sa gauche regarde le pôle austral.*

On peut le prouver avec le conducteur mobile (fig. 15), en présentant un aimant horizontalement sous εδ, on voit le conducteur mobile se tourner dans une direction perpendiculaire à l'aimant, le pôle austral se trouvant à gauche du conducteur. On peut s'assurer que cet effet n'est pas dû à l'action des divers conducteurs les uns sur les autres; car si l'on renverse les communications avec la pile, sans rien changer au reste du système, le fil εδ se retourne dans une position directement opposée à la précédente.

§ 53. *Un aimant attire un fil conducteur lorsque la gauche regarde le pôle austral de l'aimant, et que le pied de la perpendiculaire commune au conducteur et à l'aimant tombe entre les deux pôles de ce dernier. Il y a répulsion lorsque tout restant de même, la gauche du courant regarde le pôle boréal.*

Il suffit, pour prouver ce fait par expérience, de présenter un aimant à l'un des fils verticaux du conducteur (fig. 21) parallèlement au plan mobile. Quelle que soit la direction du courant, si sa gauche regarde le pôle austral, il vient s'appliquer contre l'aimant; dans le cas contraire, il s'en éloigne indéfiniment, et si l'aimant est assez énergique, la partie opposée du conducteur vient s'appliquer sur l'autre face de l'aimant.

§ 54. *Un aimant placé parallèlement à un*

conducteur mobile sur un pivot, et dans le prolongement de l'axe de rotation de ce conducteur, le fait tourner toujours dans le même sens.

A la tige S*t* (fig. 1), on adapte l'appareil mobile (fig. 19) et on place l'aimant d'abord sous la table, verticalement appuyé contre la tige. Alors si le courant est ascendant dans le conducteur et le pôle austral en haut, l'appareil tourne continuellement de l'est à l'ouest par le midi. On renverse ensuite l'aimant de manière à placer le pôle boréal en haut, le mouvement a lieu de l'est à l'ouest par le nord.

On porte l'aimant toujours vertical au-dessus de la coupe S; alors si le pôle boréal est en-dessus, le mouvement a lieu de l'est à l'ouest par le midi; en renversant l'aimant, le mouvement change de direction.

En changeant l'ordre des communications avec la pile, c'est-à-dire en rendant le courant descendant dans le conducteur vertical, on rend tous les mouvemens inverses de ceux qui viennent d'être décrits.

Si l'on ne considère que le pôle le plus rapproché du conducteur, on peut exprimer le sens des mouvemens dans tous les cas par un seul énoncé.

Le pôle austral d'un aimant, placé sous le conducteur mobile ou le pôle boréal placé au-dessus, produisent la rotation dans le même sens que la terre pour nos climats.

Le pôle austral, placé au-dessus du conducteur, où le pôle boréal en-dessous, produisent la rotation en sens inverse.

§ 55. *Un conducteur mobile autour d'un axe et soumis à l'action d'un aimant perpendiculaire à son plan et dont les deux pôles sont placés de chaque côté du plan, est amené au milieu de l'aimant lorsque la gauche du courant regarde le pôle austral; dans le cas contraire, le conducteur peut rester en équilibre instable au milieu de l'aimant, mais pour peu qu'il en soit écarté, il continue à s'en éloigner indéfiniment.*

On fait cette expérience en présentant un aimant dans la position indiquée à l'un des fils verticaux de la figure 21 : on observe alors les deux effets énoncés.

Dans le premier cas, l'équilibre est fixe, parce que si le conducteur s'écarte du milieu de l'aimant, le nombre des particules dont l'attraction tend à le ramener à cette position, est plus grand que celui des particules qui tendent à l'en écarter; dans le second cas, le nombre des particules qui repoussent le conducteur dans un sens, l'emporte sur celles qui tendent à le repousser en sens contraire, aussitôt que le plan du conducteur ne divise plus l'aimant en deux parties égales.

L'action des aimans sur les fils conducteurs

doit être accompagnée d'une réaction égale que l'on manifeste en rendant mobile une aiguille de boussole ou un petit barreau dans la sphère d'activité d'un courant électrique.

§ 56. *Une aiguille de déclinaison est déviée de sa direction par un courant parallèle à son axe, de manière que le pôle austral de l'aiguille est rejeté à gauche du courant.*

Pour faire cette expérience, on prend une portion quelconque du conducteur, et on la présente dans une situation parallèle à l'aiguille, et successivement tout autour de cette aiguille; si l'électricité va du sud au nord, voici ce que l'on observe. Quand le courant est au-dessus de l'aiguille, le pôle austral est rejeté vers l'ouest; le courant placé à l'est fait relever le pôle austral et baisser le pôle boréal; en dessous de l'aiguille, le courant repousse le pôle austral vers l'est, et placé à l'ouest, il abaisse le pôle austral et élève le pôle boréal. Les effets sont inverses lorsque l'électricité va du nord au sud.

Ce phénomène est celui qui a été découvert par M. Oersted; il est le premier exemple d'une action à distance exercée par une pile galvanique dans laquelle les communications sont librement établies, et cette action s'étant d'abord présentée à l'observation dans ses effets sur l'aimant, on avait donné au nouvel ordre de phénomènes qui en résul-

tent le nom d'*électro-magnétiques ;* mais cette dénomination doit être abandonnée, au moins dans sa généralité, depuis que l'on a découvert des effets de l'action à distance des conducteurs galvaniques, sans l'intermédiaire d'aucun aimant; on pourrait seulement la conserver, pour les effets dans lesquels les aimans et les conducteurs agissent les uns sur les autres, si l'on croyait devoir les considérer comme complètement distincts des phénomènes dus à la seule action de l'électricité. Dans tous les cas, le nom générique doit être celui d'*électro-dynamiques,* défini au commencement de cette notice.

§ 57. La manière précédente de faire l'expérience ne donne qu'un résultat compliqué de l'action de la terre et de celle du fil galvanique. Pour isoler cette dernière, il faut employer un appareil dans lequel l'action de la terre soit neutralisée, ce que l'on appelle une *aiguille astatique;* on peut le faire de plusieurs manières, soit en suspendant une aiguille sur un pivot parallèle à l'aiguille d'inclinaison, soit en contrariant l'action de la terre par celle d'un barreau fortement aimanté et convenablement disposé, ou plus simplement en attachant à un même axe deux aiguilles de boussoles égales, AB et A'B' (fig. 42), aimantées de la même manière, tournées en sens directement opposés, et suspendant cet

appareil de manière que son axe soit dans le prolongement de la verticale du point de suspension y; quel que soit celui de ces procédés que l'on emploie, on observe constamment que *le fil conjontif présenté à une aiguille astatique dans une direction quelconque, la tourne toujours à angle droit sur sa propre direction, le pôle austral à gauche du courant.*

Lorsque le courant parallèle à l'axe de suspension de l'aiguille est assez long pour être censé indéfini dans les deux sens, MM. Biot et Savard ont démontré, par expérience, que l'intensité de la force directrice est en raison inverse de la distance. M. Laplace en a déduit, par le calcul, que l'action de chaque partie infiniment petite du courant sur l'aimant, est en raison inverse du carré de la distance.

§ 58. *Une aiguille suspendue verticalement est attirée entre ses deux pôles par un courant horizontal, lorsque le pôle austral est à gauche du courant, et repoussée dans le cas contraire.*

Pour faire cette expérience, on prend une aiguille à coudre aimantée, on la suspend verticalement à un long fil, et on lui présente horizontalement entre ses deux pôles une portion du conducteur ; on observe, au moment où l'on établit les communications avec la pile, un mouvement dans l'aiguille, qui se porte vers le fil, si

le pôle austral est à gauche du courant, et qui s'en éloigne dans le cas contraire. Ce premier mouvement est le seul dont on doive tenir compte, car bientôt, par l'effet de la pesanteur, l'aiguille est ramenée vers la verticale et la dépasse par un mouvement contraire au précédent.

§ 59. *Une aiguille suspendue sur l'eau et soumise à l'action d'un courant, vient s'attacher au conducteur par son milieu, dans le cas de l'attraction : dans le cas contraire, elle s'en éloigne indéfiniment.*

Pour faire simultanément ces deux expériences, M. Boisgiraud a suspendu sur l'eau une petite aiguille à coudre enduite d'une couche d'un corps gras. Il a recourbé un fil de cuivre $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\eta$ (fig. 43), de manière à partager le niveau de l'eau en trois parties, l'une $\iota\varkappa$ comprise entre les deux portions verticales du fil, il l'appelle intérieure ; les deux autres $\iota\theta$ et $\varkappa\lambda$ comprises entre ces même fils et les parois du vase, nous les nommerons extérieures. Le plan du fil $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\eta$ étant placé perpendiculairement au méridien magnétique et le courant entrant par l'extrémité α, que je supposerai à l'orient pour fixer les idées, l'aiguille sera attirée par $\beta\gamma$ quand elle se trouvera dans la partie extérieure $\varkappa\lambda$, car alors le pôle austral sera à gauche du courant ; de même dans la partie $\iota\theta$ elle sera attiré par $\delta\varepsilon$; au contraire, dans l'inter-

valle $\iota\kappa$, l'aiguille présentera son pôle austral à droite du courant descendant $\beta\gamma$ et du courant ascendant $\delta\varepsilon$; elle sera, par conséquent, repoussée par tous les deux. En effet, si l'on place l'aiguille dans la partie intérieure, et qu'on établisse les communications dans l'ordre $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\eta$, l'aiguille s'échappe de l'intervalle $\iota\kappa$ en glissant dans le sens de sa plus grande section par le plan du conducteur, et rentre dans la partie extérieure qui se trouve être la plus voisine de son pôle à la fin de l'excursion ; alors elle glisse de nouveau en rentrant dans cet intervalle, jusqu'à ce que son milieu se trouve dans le plan du conducteur, dépasse un peu cette position en vertu de la vitesse acquise, et s'attache enfin par son milieu au fil conducteur. Si l'on renverse les communications, l'aiguille est chassée des deux parties extérieures, pénètre dans l'intérieur, et vient s'attacher par son milieu à l'un ou à l'autre des fils $\beta\gamma$ ou $\delta\varepsilon$, celui qui s'en trouve le plus près à la fin de son excursion.

§ 60. Connaissant l'action d'un aimant sur un courant rectiligne, on peut facilement en conclure ce qui arrivera quand on soumettra un conducteur voltaïque, plié d'une manière quelconque, à l'influence d'un barreau. Pour ne pas m'écarter des considérations élémentaires, je supposerai que l'axe du barreau est toujours perpendiculaire au

plan du conducteur, et j'examinerai d'abord le cas où le plan du conducteur passe par le centre du barreau, ou du moins ne s'en écarte qu'à de petites distances.

Soit d'abord le conducteur circulaire (fig. 23), mobile autour d'un de ses diamètres. Quand le barreau est dans son intérieur, le pôle austral à gauche, tous les élémens du cercle sont attirés par le barreau, et il doit y avoir équilibre entre toutes ces attractions si le plan du cercle est exactement perpendiculaire à l'axe du barreau et passe par le centre de cet axe; mais cet équilibre est instable, car si le cercle se trouve un peu incliné par rapport au barreau, les attractions sur les deux demi-circonférences opposées tendront à diminuer les angles aigus indéfiniment, et les deux parties de l'anneau viendront s'appliquer sur les deux faces opposées de l'aimant. C'est en effet ce que donne l'expérience.

Mais si le pôle austral était à droite, alors tous les élémens du cercle seraient repoussés et l'équilibre serait stable; car si le cercle se trouvait incliné, les forces répulsives émanées du barreau tendraient à augmenter les angles aigus, et par conséquent, à rétablir la position à angles droits.

§ 61. Plaçons maintenant le barreau hors du cercle, le pôle austral aura des positions différentes relativement aux deux demi-circonférences

situées de chaque côté de l'axe de révolution. Si la plus voisine du barreau est attirée, la plus éloignée sera repoussée et l'équilibre sera stable ; car, d'après ce que nous avons vu (§ 55), chaque élément attiré est en équilibre stable quand il est perpendiculaire à l'axe de l'aimant sur son milieu, et cet équilibre ne sera pas troublé par la partie repoussée qui, d'après le paragraphe cité, est en équilibre instable dans la même position. Dans le cas de répulsion de la demi-circonférence voisine du barreau, cette partie serait en équilibre instable, et si elle était écartée légèrement de sa position, la force répulsive tendrait à augmenter l'angle aigu, tandis que la force attractive, exercée par l'autre demi-circonférence, tendrait à diminuer l'angle obtus opposé ; ces deux effets réunis feront tourner le cercle de manière que sa partie attirée devienne plus voisine de l'aimant, et alors l'équilibre sera stable comme nous l'avons expliqué précédemment. Les diverses conséquences que nous venons de tirer de l'action d'un aimant sur un fil conducteur, sont parfaitement conformes aux expériences qui ont été faites par M. de la Rive, sur un conducteur circulaire adapté à un appareil flottant.

§ 62. Soit maintenant le conducteur (fig. 24) mobile autour d'un axe pris dans son plan, mais extérieur au cercle. Plaçons le barreau dans l'in-

térieur perpendiculairement au plan mobile, et son centre à peu près dans ce plan. Si le pôle austral est à gauche, chaque élément est attiré et tend à faire passer le plan mobile exactement par le centre du barreau : il y a donc équilibre stable dans cette position. Si le pôle austral est à droite, le plan mobile ne divisant jamais bien exactement l'aimant en deux parties égales, chaque élément tend à s'échapper indéfiniment dans le sens du plus petit segment; l'appareil obéit, en effet, à cette tendance, autant que le permet son mode de suspension. Lorsque le barreau est à l'extérieur, dans le plan horizontal qui passe par le centre du cercle, et son milieu peu éloigné du plan mobile, les deux demi-circonférences séparées par un diamètre parallèle à l'axe de rotation, éprouvent des effets différens, et en supposant le barreau plus loin de l'axe de rotation que le conducteur, l'effet produit sur la demi-circonférence voisine du barreau, l'emporte sur l'action opposée par la plus grande proximité et par un bras de levier plus considérable; ainsi, lorsque cette partie, que j'appellerai *antérieure*, sera attirée, le cercle sera en équilibre stable; dans le cas contraire, il s'échappera dans le sens du moindre segment du barreau.

§ 63. Reprenons le cas où l'aimant perpendiculaire au plan du conducteur (fig. 23) est passé dans son intérieur, et faisons varier sa position en

conservant l'axe toujours dans le prolongement de la même ligne. Rappelons-nous que pour déterminer la position du pôle relativement au courant, il faut mener, de l'œil de l'observateur, placé dans un élément du courant, comme on l'a expliqué (§ 51), une ligne au centre de l'aimant, et examiner si le pôle austral est à droite ou à gauche de cette ligne; il est évident que si le pôle était à gauche dans la situation primitive que je viens de rappeler, il y restera toujours, à quelque distance que l'aimant soit transporté parallèlement à lui-même.

Par suite de ce mouvement, lorsque l'aimant sera tout entier à gauche du conducteur, il lui présentera son pôle boréal, et quand il sera tout entier à droite du conducteur, il lui présentera le pôle austral. Dans les deux cas, l'effet est le même, le cercle attiré par tous ses élémens est en équilibre instable dans la position perpendiculaire au barreau, mais dans la pratique, une de ses moitiés se trouvant toujours à faire un angle aigu avec l'axe, devient prépondérante et continue à tourner jusqu'à ce que le plan devienne parallèle à l'axe du barreau.

Si au contraire, l'aimant toujours placé à l'extérieur de manière que son axe prolongé passe par le centre du cercle, présente son pôle austral à gauche ou son pôle boréal à droite du courant, le

cercle est repoussé dans tous ses élémens et se met en équilibre stable dans la situation perpendiculaire à l'axe de l'aimant.

§ 64. Dans ces deux expériences, il est évident que sans la résistance de l'axe de suspension, le conducteur en masse serait animé d'un mouvement de translation qui le rapprocherait de l'aimant, dans le cas de l'attraction, et l'en éloignerait, dans le cas de la répulsion. On peut manifester ces mouvemens à l'aide du conducteur (fig. 24). En effet, si on lui présente le pôle boréal d'un aimant à gauche, ou le pôle austral à droite, il s'avance vers l'aimant; si, au contraire, on lui présente le pôle boréal à droite, ou le pôle austral à gauche, il est repoussé. On obtient les mêmes effets en présentant l'aimant au cercle sous une inclinaison quelconque, pourvu que le barreau soit tout entier hors de l'espace renfermé entre les deux plans verticaux, menés aux extrémités des deux cercles dont se compose l'appareil, perpendiculairement à la ligne qui joint leurs centres. Cette condition est indispensable pour que le mode de suspension et l'influence du cercle opposé ne contrarient pas l'action principale. L'influence du second cercle tend évidemment à contrarier celle du premier; quant au mode de suspension, il pourrait rendre prépondérante une action exercée sur la demi-circonférence la plus éloignée de l'axe de suspension,

parce qu'elle se trouve appliquée à un plus grand bras de levier.

§ 65. Nous pouvons maintenant expliquer l'action des aimans sur les conducteurs pliés en hélices. En effet, nous avons vu que ces hélices étaient équivalentes à plusieurs cercles parallèles, dont les centres sont situés sur un même axe, et que le courant galvanique parcourt tous dans le même sens. Que l'on présente parallèlement à l'une de ces hélices, celle de la fig. 40 par exemple, un barreau aimanté situé tout entier hors du cylindre sur lequel l'hélice est enroulée, et de l'espace renfermé entre les plans de ces deux spires extrêmes prolongées, ce que j'appellerai un aimant extérieur à l'hélice; il existera sur les deux parties opposées de chaque spire des actions contraires, et l'effet résultant dépendra de l'action exercée sur la demi-circonférence la plus voisine; des effets du même genre se répétant pour chaque cercle, il en résultera des attractions ou des répulsions de l'hélice en masse; or, si cette hélice est suspendue de manière à tourner autour d'une ligne perpendiculaire sur le milieu de son axe, le sens du mouvement de rotation dépendra du genre d'action exercée sur la moitié de l'hélice la plus rapprochée de l'aimant; il ne reste qu'à déterminer dans chaque cas le genre de cette action. Supposons l'hélice dirigée par l'action de la terre;

on sait qu'alors (§ 45) le courant est descendant à l'est et ascendant à l'ouest. Présentons-lui un aimant horizontal extérieurement. Pour fixer les idées, je le supposerai à l'est et au nord du cylindre; alors si l'aimant est à gauche du courant dans la moitié orientale de chaque spire, il est à droite de la partie occidentale; si donc il présente à l'hélice son pôle boréal, il attire la partie orientale et repousse la partie occidentale; la première de ces actions étant plus forte que la seconde pour toutes les spires, l'hélice tendrait à se porter en masse vers le barreau si elle était libre. Son mode de suspension ne lui permet que de tourner autour d'un axe vertical; alors, la moitié de l'hélice tournée vers l'aimant détermine le sens du mouvement, à cause de sa plus grande proximité, et il en résulte une attraction apparente entre le pôle de l'aimant et l'extrémité de l'hélice qui se dirige au nord par l'action de la terre. En faisant passer l'aimant à l'ouest et au nord de l'hélice, il se trouve à gauche du courant, dans la partie occidentale de l'hélice, et à droite de la partie orientale; il attire donc la première et repousse la seconde; mais l'attraction l'emporte sur la répulsion, parce qu'elle s'exerce à une moindre distance : aussi dans cette nouvelle position, le pôle boréal paraît encore attirer la partie de l'hélice qui se dirige au nord par l'action de la terre.

En présentant l'aimant au-dessus ou au-dessous de l'hélice, on reconnaît par les mêmes raisonnemens, et on vérifie par expérience, que dans ces deux positions, il y a encore attraction apparente entre le pôle boréal de l'aimant et la partie de l'hélice dirigée au nord par l'action de la terre. On trouve de même, et l'expérience confirme, que le pôle boréal repousse la partie de l'hélice qui se dirige au midi ; que le pôle austral, au contraire, attire cette partie de l'hélice, et repousse celle qui se dirige au nord.

Tous ces effets sont encore les mêmes lorsque l'aimant cesse d'être parallèle à l'axe de l'hélice, pourvu qu'il lui reste extérieur. Ils sont tous accompagnés d'une réaction que l'on peut manifester en présentant à une aiguille aimantée l'hélice (fig. 41).

§ 66. Lorsque l'aimant est situé en tout ou en partie dans l'espace compris entre les plans prolongés des spires extrêmes, les phénomènes se compliquent ; on peut bien alors, par des raisonnemens analogues aux précédens, en prévoir les principales circonstances, mais leur évaluation précise dépend de la forme et de la grandeur de l'aimant, et de la distribution du magnétisme dans sa substance. Cependant en restreignant toutes les expériences relatives à l'action mutuelle des aimans et des conducteurs voltaïques, aux circonstances qui

ont été décrites en parlant de chacune d'elles, on peut les renfermer toutes dans l'énoncé suivant: *Le conducteur d'un courant électrique agit sur l'aiguille aimantée, comme il agirait sur une aiguille non aimantée, mais à laquelle seraient attachées, dans un plan perpendiculaire à la ligne qui en joint les pôles, une ou plusieurs portions de circuit voltaïque, dont le courant électrique tournerait autour de l'aiguille, relativement à ses pôles, dans le même sens où le soleil paraît tourner autour de notre globe, relativement aux pôles de la terre qui portent les mêmes noms que ceux de l'aimant.*

§ 67. L'analogie entre les aimans et les conducteurs voltaïques qui parcourent des courbes fermées, devient encore plus frappante quand on rapproche les observations des § 49, 51, 65; il résulte, en effet, de leur ensemble, que *l'on peut imiter les attractions et répulsions qui ont lieu entre deux aiguilles aimantées, l'une fixe et l'autre mobile, en substituant à l'une ou à l'autre, ou à toutes deux, des cylindres électro-dynamiques.* Cette analogie remarquable, et qui s'étend à un si grand nombre de phénomènes, a conduit M. Ampère à présenter une nouvelle théorie du magnétisme, qui consiste à attribuer les propriétés des aimans à des courans électriques, situés dans des plans perpendiculaires aux axes des barreaux.

Cette théorie des courans électriques est assujettie à quelques conditions qui résultent des propriétés déjà connues des aimans et des courans eux-mêmes. En effet, les expériences de Coulomb ont démontré que les fragmens détachés d'un barreau aimanté étaient eux-mêmes des aimans complets; donc, les courans imaginés pour rendre compte des effets magnétiques, ne doivent pas être conçus comme entourant toute la masse de l'aimant, mais comme circulant autour des fragmens qui conservent les propriétés magnétiques après la séparation d'avec le barreau, c'est-à-dire autour de particules moindres que celles que l'on obtient par la division mécanique. On doit donc regarder non pas chaque molécule intégrante, mais chaque particule cristalline du corps, comme une pile qui a la propriété électro-motrice et ses conducteurs, de sorte que le fluide naturel se décompose à l'une des extrémités de la particule; le fluide vitré et le fluide résineux résultant de cette décomposition, circulent chacun de leur côté, jusqu'à l'extrémité opposée de la particule où ils se recomposent pour former du fluide naturel. Leur marche est représentée (fig. 44), celle du fluide positif par la flèche pleine, et celle du fluide négatif par la flèche ponctuée.

Maintenant si l'on remarque que du fluide négatif, circulant dans une direction, produit les

mêmes effets que du fluide positif circulant en sens contraire, on verra que la route de ces deux fluides équivaut à un courant continu de fluide positif qui ferait le tour de la particule dans le sens $\alpha\beta\gamma\delta$.

Ces idées théoriques sur la propriété électromotrice des particules de certains corps, sont autorisées par des faits connus; ainsi la tourmaline et un grand nombre d'autres minéraux développent de l'électricité dans des circonstances particulières, et on ne peut douter que dans un cristal de grosseur finie, l'effet observé ne soit le résultat de tous les phénomènes du même genre produits dans les petits cristaux élémentaires que j'ai nommés, pour l'acier, *particules cristallines*. Il est vrai que dans la tourmaline et les autres minéraux, l'électricité ne se manifeste que par sa tension, parce que ces minéraux ne sont pas conducteurs de l'électricité; mais si au pouvoir électro-moteur de la tourmaline on réunit la faculté conductrice, on aura une idée juste de la manière dont on peut concevoir les petites piles élémentaires des aimans.

§ 68. L'existence des courans électriques dans le fer et dans l'acier est devenue plus probable depuis que M. Seebeck a prouvé qu'on peut établir un courant électrique dans un circuit exclusivement formé de conducteurs solides. Ce savant

a découvert que si, après avoir soudé deux barreaux de métaux différens, de manière à en former un circuit fermé, on chauffe une des soudures, il s'établit dans le système un courant électrique que l'on manifeste par son action sur l'aiguille aimantée. Nous sommes ainsi en possession d'un nouveau genre de circuits électriques qu'on peut appeler *circuits thermo-électriques*, pour les distinguer des circuits galvaniques, qu'il serait désormais convenable d'appeler *hydro-électriques*. Ces deux dénominations renferment dans leur signification tous les courans que l'on sait produire artificiellement dans l'état actuel de la science : cependant elles me paraissent insuffisantes, puisqu'elles ne comprennent pas les courans qui pourraient être produits dans des conducteurs entièrement solides par des agens autres que la chaleur : je proposerais, en conséquence, de diviser les courans électriques en deux genres : les courans produits avec l'intermédiaire des liquides, ou courans *hydro-électriques*, et les courans produits dans des systèmes entièrement solides, que l'on nommerait par opposition *stéréo-électriques*. Les courans thermo-électriques sont, jusqu'à présent, les seuls du second genre dont l'existence soit incontestable ; mais si les courans particulaires des aimans ont une existence réelle, ils forment une seconde espèce du même genre.

§ 69. Pour bien caractériser l'état de la science, je crois que l'on doit diviser les courans électriques sous un autre point de vue, en *continus* et *discontinus*. Les premiers sont ceux qui parcourent des conducteurs parfaits, et dont l'intensité ne varie que par degrés insensibles, entre deux instans consécutifs : tels sont ceux qui s'établissent dans les circuits thermo-électriques, et dans les piles de Volta à auges, à couronnes de tasses, ou à élémens plongeans. Les courans *discontinus* ont lieu dans des conducteurs imparfaits. Cette espèce de corps permet à l'électricité de s'accumuler jusqu'à un certain terme, pour lequel le corps n'isole plus ; l'électricité passe alors par explosion ; et si la force électro-motrice continue à s'exercer, l'électricité s'accumule de nouveau, produit une seconde explosion, et ainsi de suite. Ces alternatives entre le passage de l'électricité et son état de tension peuvent être assez rapides pour échapper à nos sens, et produire l'apparence d'un courant sans interruption : telle est l'espèce de courant que je nomme *discontinu*, et dont le caractère distinctif est de ne pas dévier l'aiguille aimantée. Je citerai pour exemple le courant d'une machine électrique à deux électricités, dont on fait communiquer les deux conducteurs par une tige métallique, et les courans d'une pile de Volta, construite avec des disques alternativement mé-

talliques et humides. Tous les courans hydro-électriques doivent devenir discontinus lorsque la pile a réagi pendant quelque temps sur elle-même, ou quand on les transmet par des fils fins. Ainsi, il est probable qu'ils conservent encore la propriété d'aimanter l'acier, lorsqu'ils ne peuvent plus dévier l'aiguille aimantée; car tel est le caractère des courans discontinus quand ils sont doués d'une assez grande énergie.

Quoiqu'il paraisse d'abord contradictoire qu'un courant aimante l'acier et ne dévie pas la boussolle de sa direction, cependant il est facile de voir qu'un courant discontinu doit jouir à la fois de cette double propriété. En effet, quelle que soit l'opinion que l'on adopte sur le magnétisme, aimanter n'est toujours que déterminer une nouvelle disposition dans un fluide d'une ténuité extrême, ce qui peut être produit par une action d'une très courte durée; mais dévier l'aiguille aimantée, c'est imprimer une vitesse finie à une masse appréciable, ce qui ne peut être produit par aucune force dont l'action est instantanée. Ainsi, une seule explosion d'une bouteille de Leyde, ou d'une batterie, ou même l'étincelle d'une machine électrique, produira l'aimantation d'une aiguille d'acier; il en sera de même d'une série d'étincelles, ou d'un courant discontinu. Mais les mêmes causes ne pourront produire aucune

déviation sensible sur l'aiguille aimantée, si l'intervalle qui sépare deux impulsions est tel, que l'effet de la première soit détruit par l'inertie de l'aiguille et les obstacles qui s'opposent à son mouvement, avant que l'effet de la seconde impulsion puisse se faire sentir.

§ 70. D'après l'ensemble de nos connaissances sur l'électricité, on peut prouver sa présence dans un état de tension, même très faible, avec l'électroscope condensateur, dans l'état de courant continu par la déviation de l'aiguille aimantée, et l'on est même parvenu à amplifier cet effet, à l'aide d'un instrument que l'on nomme *multiplicateur électro-magnétique*, dont on trouvera plus loin la description; enfin, dans l'état de courant discontinu intense, on peut la manifester encore par l'aimantation de l'acier; mais si le courant est faible et discontinu, on n'a, jusqu'à ce jour, aucun moyen d'en prouver l'existence. Si cette lacune dans nos moyens d'observations était comblée, il est hors de doute qu'elle ouvrirait un vaste champ de découvertes, et qu'on trouverait l'électricité dans une foule de systèmes, soit naturels, soit artificiels, où il est impossible de la reconnaître maintenant, et où cependant elle doit influer sur un grand nombre de phénomènes.

§ 71. L'étude des courans thermo-électriques présente plusieurs questions qui touchent, d'une part,

à l'électricité dynamique; de l'autre, à la théorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides. M. Oersted et M. le baron Fourier se sont réunis pour en examiner une par la voie de l'expérience. C'est la question de savoir si les effets thermo-électriques peuvent être agrandis par la répétition alternative des barreaux de diverses matières, et comment il faut procéder pour obtenir de tels effets. Ils ont examiné subsidiairement quel était sur ces courans l'effet d'un changement dans les dimensions des barreaux.

L'appareil dont ces deux savans se sont d'abord servis, est composé de trois barreaux de bismuth et de trois autres d'antimoine, soudés alternativement ensemble, en sorte qu'ils forment un circuit thermo-électrique complexe, renfermant trois élémens. La longueur des barreaux est d'environ 12 centimètres, leur largeur de 15 millimètres, et leur épaisseur de 4 millimètres. On met ce circuit sur deux supports, et dans une position horizontale, en observant de donner à un des côtés de l'hexagone la direction de l'aiguille aimantée : on place ensuite une boussole aussi près que possible au-dessous de ce côté.

En échauffant une des soudures à l'aide de la flamme d'une bougie, on produit déjà un effet bien sensible sur l'aiguille. En échauffant deux soudures, qui ne soient pas voisines, on voit

la déviation augmenter considérablement. Lorsqu'enfin on élève la température des trois soudures alternatives, on parvient à un effet plus grand encore.

Ces messieurs ont aussi fait usage d'un procédé inverse, c'est-à-dire, qu'ils ont réduit à zéro, par de la glace fondante, la température d'une ou de plusieurs soudures de circuit. On conçoit facilement qu'alors les soudures qui ne sont pas refroidies, doivent être considérées comme échauffées par rapport aux autres. Cette manière d'opérer permet d'établir entre les différentes expériences les comparaisons sans lesquelles on ne pourrait pas découvrir les lois de ce genre de phénomènes.

En combinant l'action de la glace avec celle de la flamme, c'est-à-dire en échauffant les trois soudures qui n'étaient pas refroidies, ils sont parvenus à un effet très considérable : la déviation de l'aiguille est montée alors jusqu'à 60 degrés.

Ils ont plus tard continué ces expériences avec un appareil composé de 22 barreaux de bismuth et de 22 d'antimoine, beaucoup plus épais que ceux de l'hexagone, et se sont ainsi convaincus que chaque élément contribue à l'effet total.

Ayant ouvert le circuit dans un point, ils ont fait souder aux barreaux séparés de petites coupes de laiton, qui, ensuite, ont été remplies de mercure, afin de pouvoir établir à volonté, entre leurs

extrémités, une communication sûre à l'aide de fils métalliques. Un fil de cuivre d'un décimètre de longueur et d'un millimètre d'épaisseur, était presque suffisant pour rétablir la communication entière : avec deux fils semblables placés l'un à côté de l'autre, la communication était parfaite. Un fil de même diamètre, mais de plus d'un mètre de longueur, transmettait encore assez bien le courant; tandis qu'un fil de platine d'un demi-millimètre de diamètre et de 4 décimètres de longueur, établissait si imparfaitement la communication, que la déviation de l'aiguille aimantée n'était pas même d'un degré. Quand le corps interposé était une languette de papier mouillé d'une solution saturée de soude, on n'observait aucun effet appréciable.

Il est digne de remarque qu'un appareil capable de donner de si grands effets électro-magnétiques, ne produisait ni action chimique, ni ignitions sensibles.

On peut encore ajouter que l'effet du circuit électro-magnétique complexe est beaucoup moindre que la somme des effets isolés que pouvaient produire les mêmes élémens employés à former des circuits simples.

§ 72. Les expériences ont été répétées avec des barreaux dont la section transversale est un carré de 15 millimètres de côté. Je les exposerai ici en détail, d'après la note que MM. Oersted et

Fourier ont fait insérer dans les Annales de Physique et de Chimie, tome XXII, page 375 et suivantes.

Ire *Expérience.*

On a composé un circuit rectangulaire *abdc* (fig. 47). Une moitié *acd* était d'antimoine, l'autre *abd* de bismuth. Ces deux moitiés étaient soudées ensemble ; on avait ainsi deux côtés contigus d'antimoine et deux côtés contigus de bismuth. La longueur du plus grand côté était de 12 centimètres ; celle de l'autre, 8.

Le circuit ayant été posé horizontalement sur des supports, avec deux de ses côtés, dans la direction de l'aiguille aimantée, on a placé la boussole sur l'un d'entre eux ; ensuite on n'a plus touché à l'appareil pour lui laisser reprendre un équilibre de température qui avait pu être troublé par la main de l'observateur : ce n'est qu'après un certain temps qu'on a mis de la glace sur une des deux soudures *a*, ou qui joignent les métaux hétérogènes. La boussole a montré alors une déviation de 22 ou 23 degrés, la température de l'atmosphère étant de 14 degrés centigrades. A une température de 20 degrés, on a observé une déviation de 30 degrés ; mais comme on avait, au commencement, négligé de noter la température de l'atmosphère, les comparaisons des résultats

ne peuvent être établies qu'entre des expériences faites, pour ainsi dire, en même temps.

2ᵉ *Expérience.*

On a formé un autre circuit (fig. 48) à peu près de la même largeur, mais dans lequel les côtés opposés étaient du même métal; par exemple, *ab* et *cd* de bismuth, *ac* et *bd* d'antimoine; on mit l'appareil en action en plaçant de la glace sur deux angles opposés: ce circuit produisit une déviation de 30 à 31 degrés, dans les mêmes circonstances où le circuit simple ne donnait que 22 à 23 degrés. La température dans ce circuit se met très vite en équilibre, de manière que l'effet thermo-électrique y paraît plus faible qu'il ne l'aurait été sans cette circonstance.

3ᵉ *Expérience.*

Un circuit ABDC (fig. 49), dont le contour avait une longueur double de celle du circuit de la première expérience, fut mis en action par de la glace placée sur une de ses soudures. La déviation ne fut que de 13 à 15 degrés, sous les mêmes circonstances où le circuit (fig. 47) donna 22 à 23 degrés.

4ᵉ *Expérience.*

On forma un autre circuit (fig. 50) de la même longueur que celui de l'expérience précédente;

mais on lui donna quatre alternatives ou quatre élémens thermo-électriques *ab*; *a* désigne l'antimoine, *b* le bismuth. Ce circuit fut mis en action par de la glace placée sur les soudures de deux en deux. La déviation de l'aiguille aimantée fut alors de $31°\frac{3}{4}$, sous les mêmes circonstances où le circuit simple de longueur égale de la troisième expérience ne produisit qu'une déviation de 13 à 15 degrés; mais il faut se rappeler que le circuit de la deuxième expérience (fig. 48), qui n'avait que la moitié de longueur en circonférence, et la moitié de nombre d'élémens, donna à peu près le même effet. On voit ainsi, et ce résultat sera confirmé par les expériences ultérieures, que les déviations de l'aiguille produites par le circuit thermo-électrique augmentent avec le nombre des élémens quand la longueur du circuit reste la même, mais qu'elles deviennent plus faibles à mesure que la longueur augmente. On voit de plus, et ceci deviendra encore plus évident dans la suite, que ces deux effets se balancent; en sorte que l'effet d'un circuit ne change pas lorsque la longueur de la circonférence augmente dans la même proportion que le nombre des élémens, ou, en d'autres termes, que des élémens de longueur égale forment des circuits qui produisent des déviations égales, quel que soit le nombre de ces élémens. Ces résultats ont été confirmés en comparant les

effets de circuits d'un, de deux, de trois, de quatre, de six, de treize et de vingt-deux élémens.

Pour former des circuits complexes capables de produire un très grand effet sur l'aiguille aimantée, on sera obligé de se servir d'élémens très courts; il en résultera, il est vrai, l'inconvénient que l'équilibre de température se rétablira rapidement dans le circuit, à moins qu'on ne mette les soudures alternatives, les unes en communication avec une source continuelle de chaleur, les autres en communication avec une source continuelle de froid. Il existe un effet du circuit thermo-électrique complexe, qui n'est pas ainsi borné par la longueur de la circonférence; mais, avant d'en parler, voyons quel est le mode d'action des différens élémens de l'appareil complexe.

5e *Expérience.*

On a examiné les effets d'un circuit complexe, en refroidissant d'abord une, ensuite deux, puis trois, etc., des soudures qui devaient être mises en activité; et, par plusieurs expériences, on a trouvé les nombres moyens suivans :

Dans un circuit de deux élémens, la première soudure étant seule refroidie, a donné une déviation de.......................... 21°;

Les deux ensemble...................... $32^\circ \frac{1}{2}$.

Dans un circuit de trois élémens, le refroidissement d'une seule soudure a donné une déviation de............ $15^\circ \frac{5}{8}$;
Les deux premiers.................. $25^\circ \frac{7}{8}$;
Les trois ensemble.................. 31°.

Dans un circuit de quatre élémens, la glace sur une soudure donna une déviation de. $13^\circ \frac{1}{4}$;
deux soudures.................... 19° ;
trois............................ 25° ;
quatre........................... $31^\circ \frac{3}{4}$.

Dans un circuit de six élémens, une soudure a donné une déviation de....... 9° ;
Les deux premières.................. $13^\circ \frac{3}{4}$;
Les trois premières.................. $18^\circ \frac{1}{2}$;
Les quatre premières................ 22° ;
Les cinq premières.................. $25^\circ \frac{2}{3}$;
Les six ensemble.................... $28^\circ \frac{2}{3}$.

On voit que la déviation que produit la première soudure refroidie est représentée d'une manière assez approchée par le quotient double obtenu en divisant par le nombre des élémens, plus un, la déviation totale que produit le circuit quand tous ses élémens sont mis en activité. On voit aussi que les autres nombres s'approchent beaucoup de la valeur du quotient simple ; mais cependant ils paraissent former une série décroissante.

Il est toujours question ici des déviations mesurées par les angles, et non pas de la grandeur réelle des effets. S'il ne fallait pas avoir égard aux différentes distances de tous les points qui agissent l'un sur l'autre dans les différentes positions de l'aiguille, et peut-être même à la situation réciproque plus ou moins oblique des tranches du conducteur et de l'aiguille, on pourrait représenter les effets par les tangentes des déviations. Il est toutefois remarquable que les expériences donnent un rapport si constant entre les déviations. Si ces expériences étaient susceptibles de plus d'exatitude, on pourrait sans doute parvenir à en tirer des conséquences intéressantes pour la théorie.

6e *Expérience.*

On peut rendre sensible l'action thermo-électrique par le moyen d'un multiplicateur électro-dynamique. Pour obtenir cet effet, on combine une pièce *a* (fig. 51) de l'un des deux métaux avec deux pièces *b* de l'autre : cet arrangement constitue un circuit rompu dont les deux extrémités sont du même métal.

Après avoir mis de la glace sur une des soudures, on établit la communication entre les deux pièces *b*, au moyen du fil du multiplicateur. L'effet est appréciable sur l'aiguille de l'instrument, mais

cependant il est très faible ; plus faible, par exemple, que l'effet d'une pièce de cuivre et d'argent avec de l'eau pour conducteur liquide. On rend l'effet plus sensible en communiquant à l'aiguille une nouvelle impulsion à la fin de chaque oscillation rétrograde, résultante de l'impulsion précédente.

La faiblesse extraordinaire de cette action est très remarquable. On voit, par ce résultat, que les mêmes élémens thermo-électriques, qui produisent un grand effet sur l'aiguille aimantée de la boussole quand la communication s'établit par un conducteur court et épais, n'agissent que très peu, même sur une aiguille supportée par un fil, et conséquemment beaucoup plus sensible quand la communication se fait à l'aide d'un conducteur d'une longueur considérable et mince. Un courant hydro-électrique excité par une pièce de zinc et une d'argent, avec de l'eau pour conducteur liquide, produit sur l'aiguille du multiplicateur un effet peut-être cent fois plus grand que le courant thermo-électrique; et néanmoins l'effet qu'a le premier sur l'aiguille de la boussole est presque insensible, même quand on établit la communication entre les élémens par les meilleurs conducteurs, tandis que le second imprime à l'aiguille des déviations considérables. Pour suivre les conséquences théoriques de cette observation, rap-

pelons-nous que tous les effets des appareils électro-moteurs varient avec deux elémens, 1°. la quantité d'électricité développée dans un temps donné, qui est proportionnelle à la surface des plaques dans une pile de Volta; 2°. la force avec laquelle l'électricité tend à se répandre dans les différentes parties du système, et à surmonter la résistance que lui opposent les conducteurs imparfaits; cette force est proportionnelle au nombre des plaques. Pour étendre cette distinction à tous les courans électriques de quelque manière qu'ils soient produits, on nomme le premier élément *quantité des forces électriques*, le second *intensité des forces électriques*. Avec ces conventions on peut énoncer le fait observé de la manière suivante : le circuit thermo-électrique contient les forces électriques en quantité beaucoup plus grande qu'aucun circuit hydro-électrique de grandeur égale; tandis que, au contraire, l'intensité des forces dans ce dernier circuit est beaucoup plus forte que dans l'autre.

Parmi les différens effets que produit une pile galvanique, les uns dépendent de la quantité, les autres de l'intensité des forces électriques. Depuis les premières expériences électro-magnétiques, on a bien vu que la déviation de l'aiguille produite par le courant électrique se réglait d'après la quantité des forces électriques, et non pas d'après

leur intensité. Ainsi, la déviation considérable que produit le courant thermo-électrique est un indice de la grande quantité de forces qu'il contient. D'autre part, il est bien reconnu qu'un courant électrique pénètre d'autant plus facilement les conducteurs, qu'il est plus intense. Le courant hydro-électrique, qui se transmet plus facilement à travers le fil du multiplicateur que ne le fait le courant thermo-électrique, doit donc aussi être plus intense. La plus grande quantité de forces électriques qu'il faut reconnaître dans le courant thermo-électrique, ne portera pas d'atteinte à ce raisonnement ; car il est bien évident que, dans le cas où un courant A d'une intensité égale à celle d'un autre courant B, mais d'une quantité plus grande, est présenté à un conducteur qui suffit seulement pour transmettre la quantité de B, ce conducteur doit être capable de transmettre une partie du courant A égale au courant B ; et si nous supposons à A une intensité plus forte que celle de B, la transmission de celui-là sera encore plus copieuse.

7e *Expérience.*

On a essayé l'effet du circuit complexe sur l'aiguille du multiplicateur, et on a trouvé qu'il augmentait considérablement avec le nombre des élémens du circuit, même dans les cas où cette mul-

tiplication des élémens n'ajoutait rien à l'effet sur la boussole. Ce résultat a été déduit d'expériences faites avec six, avec treize et avec vingt-deux élémens. Il paraît donc que l'intensité des forces s'accroît dans le circuit avec le nombre de ses élémens, précisément comme cela a lieu dans la pile de Volta. Le circuit n'a pas eu d'effet sensible sur la boussole lorsque la communication a été établie par le fil multiplicateur.

8ᵉ *Expérience.*

Un fil de platine de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre n'a pas été mis en ignition par un circuit thermo-électrique de 13 élémens, assez intense cependant pour faire dévier la boussole de 28 degrés. Un circuit hydro-électrique, capable de produire un effet pareil sur la boussole, suffit parfaitement pour rougir le même fil.

Cette différence est due à la trop faible transmission du courant thermo-électrique par le fil de platine. En établissant la communication à l'aide de ce fil, l'aiguille de la boussole ne montra que 2 ou 3 degrés de déviation. Un fil de fer de $\frac{1}{5}$ de millimètre ne fut pas non plus mis en ignition. La communication établie par ce fil produisit bien une déviation plus grande que le fil de platine, mais cependant seulement de 5 degrés. On doit présumer qu'un circuit thermo-électrique de plu-

sieurs centaines d'élémens produira un courant assez intense pour mettre en ignition un fil métallique.

9e Expérience.

On n'a pu produire aucune action chimique bien sensible par le circuit thermo-électrique. Les liquides qui ont le plus de faculté conductrice ont résisté à son action, par exemple, l'acide nitrique, la solution de soude, plusieurs solutions métalliques. Une seule de ces expériences, dans plusieurs essais, a paru donner quelque effet chimique.

On a mis entre deux pièces de 5 francs parfaitement neuves et de la même année, une lame de papier joseph, imbibée d'une solution de sulfate de cuivre; on a eu la précaution de mettre les deux pièces de monnaie en contact avec le papier par les côtés qui portent la même empreinte, et on a fait passer le courant thermo-électrique par les deux pièces de métal et le papier mouillé. Après un quart d'heure, il y a eu quelques points de l'argent qui avaient une teinte très faible de cuivre; mais, comme cette trace de précipitation métallique ne résistait pas à un lavage accompagné d'un frottement faible, les auteurs de l'expérience sont disposés à la considérer comme trop douteuse. Dans le temps que les deux pièces d'argent avec le papier faisaient partie du circuit, il ne montra pas le moindre effet sur la boussole;

en sorte que cette mince feuille de papier mouillé interrompit, pour ainsi dire, entièrement le courant thermo-électrique. Dans un état de si parfait isolement, on ne devait non plus espérer d'effet chimique sensible. D'après l'intensité faible indiquée par le multiplicateur, on a lieu de penser qu'il faut un circuit thermo-électrique de plusieurs centaines d'élémens, pour pénétrer aussi bien un liquide que le fait l'électricité d'une pile de Volta à quatre ou cinq élémens; mais il est vraisemblable qu'un tel appareil produira des effets semblables à ceux qu'on pourrait attendre de piles hydro-électriques dont les élémens métalliques auraient une largeur énorme.

10e *Expérience.*

L'action sur le corps animal est une des plus remarquables de celles qu'exercent les courans électriques. Le circuit thermo-électrique n'a pas donné de saveur sensible lorsqu'on l'a fait agir sur la langue; mais sur une grenouille préparée, il a produit l'effet de deux métaux fort peu différens. Ce résultat nous fait voir combien les nerfs d'une grenouille sont des excellens conducteurs.

11e *Expérience.*

Un circuit thermo-électrique de treize élémens

n'a fait voir aucun effet sur les électromètres les plus sensibles. Le condensateur de Volta n'a pas donné non plus de signes d'électricité assez indubitables de ce circuit; mais cette expérience n'a pas été répétée autant qu'elle le mérite.

12e *Expérience.*

Les expériences que nous avons indiquées font déjà assez voir combien la faculté conductrice des corps est faible par rapport au courant thermo-électrique. L'expérience suivante reproduit sous d'autres formes le même résultat.

On a placé le grand circuit, qui est un rectangle presque quatre fois plus long que large, d'une telle manière, que les deux côtés les plus courts fussent parallèles à l'aiguille de la boussole. On a placé sur l'un de ces côtés la boussole, et on a mis en activité les élémens adjacens. Après avoir observé la déviation de l'aiguille, on a établi, au moyen d'un fil de cuivre, la communication entre les parties actives les plus éloignées de la boussole, en sorte que toutes les parties actives formassent un circuit à part. Après cette diminution de la circonférence du circuit, l'aiguille a indiqué une action plus forte. Cet effet n'aurait pas pu cependant être bien sensible, si la transmission du courant thermo-électrique n'eût été tellement difficile dans le métal même, qu'une

différence de chemin de deux ou trois pieds y devait introduire un changement d'effet bien considérable. Il faut remarquer que le même fil de cuivre employé pour établir la communication, lorsqu'on avait ouvert le circuit entier quelque part, faisait à peine le même effet que la fonction immédiate des parties séparées.

Lorsqu'on mit en activité la partie du circuit la plus éloignée de la boussole, et qu'on établit une communication semblable, la déviation de l'aiguille diminua. D'ailleurs cette difficulté de la transmission n'a rien qui doive nous surprendre; car l'électricité excitée dans un circuit de conducteurs, par suite de leur contact, doit s'écouler à mesure qu'elle parvient à l'intensité nécessaire pour rompre l'obstacle que ces conducteurs lui opposent. Ainsi, cette électricité n'arrivera jamais à une intensité suffisante pour pénétrer avec une grande facilité le conducteur; mais elle constituera un courant aussitôt que le circuit ne lui opposera plus l'obstacle d'une isolation très considérable. Il est facile aussi de voir que la quantité de l'électricité développée par cette excitation continuelle qui a lieu dans les circuits, doit être d'autant plus grande que le circuit est plus parfait conducteur. Ainsi, le circuit thermo-électrique donnera une quantité d'électricité incomparablement plus grande que celle qu'on pouvait

tirer d'aucun autre appareil inventé jusqu'à notre temps. Si, à l'aide des anciens, circuits on a décomposé successivement l'eau, les acides et les alcalis, il n'est pas hors des limites de la vraisemblance qu'on parviendra, par le nouveau, à décomposer les métaux eux-mêmes, et à compléter ainsi le grand changement qu'a commencé dans la Chimie la pile de Volta.

§ 73. Nous avons vu que l'intensité du courant thermo-électrique augmente avec le nombre des élémens quand la longueur du circuit reste la même, mais qu'elle devient plus faible à mesure que la longueur augmente; de plus, ces deux effets se balancent, et on peut regarder comme une loi, au moins approchée, que l'intensité d'un circuit est proportionnelle au nombre de ses élémens et en raison inverse de la longueur du circuit. Ce résultat est favorable à la théorie électrique des aimans, car il explique comment des courans très petits, comme doivent l'être les courans particulaires, exercent cependant des forces très énergiques, puisqu'il y a des aimans qui supportent des poids considérables.

§ 74. Après cette digression sur les courans thermo-électriques, revenons aux aimans. Dans la théorie électrique on doit considérer une file de particules parallèles à l'axe de l'aimant comme formant, par la réunion de leurs courans circulaires,

un appareil absolument semblable à l'hélice (fig. 27), ou plus exactement un cylindre droit entouré par un grand nombre de courans circulaires qui vont tous dans le même sens.

Pour déterminer le sens des courans, rappelons-nous que, dans une courbe dirigée par l'action de la terre, le courant est ascendant à l'ouest, va de l'ouest à l'est dans la partie supérieure, descend par la branche orientale et retourne de l'ouest à l'est dans la partie inférieure. Telle sera donc la direction des courans dans chaque particule d'un barreau aimanté soumis à l'influence du globe. Pour juger des effets qui en doivent résulter, concevons un aimant cylindrique à base circulaire divisé en couches concentriques à partir de l'axe.

Soit $\alpha\beta\gamma$ (fig. 45), une section du cylindre, par un plan parallèle aux courans et par conséquent perpendiculaire à l'axe, représentons par de petits cercles les courans des particules qui forment la couche que l'on considère (les flèches marquent la direction de ces courans). Dans quelque position que l'on présente un aimant à cette couche, il exercera le même genre d'action sur toutes les particules qui la composent, et toujours le sens de la résultante sera déterminé par la position relative de l'aimant et des parties de courans qui en sont les plus voisines. La couche entière se dirigera donc toujours comme le ferait un

cercle unique dans lequel le courant aurait lieu dans le même sens ; en d'autres termes, on peut remplacer l'ensemble des particules par le cercle $\alpha\beta\gamma$. Les mêmes raisonnemens s'appliquent à toutes les couches. Il en résulte qu'une section faite dans un aimant perpendiculairement à son axe, peut être remplacée par des conducteurs voltaïques qui parcourent des courbes fermées parallèles et concentriques. C'est en faisant cette substitution que l'on peut dire d'un aimant dirigé par l'action de la terre, que ses courans vont de l'ouest à l'est dans la partie supérieure, de l'est à l'ouest sur la face inférieure. Cette disposition est représentée (fig. 46), les flèches pleines désignent les courans de la partie supérieure, les flèches ponctuées ceux de la face inférieure.

§ 75. Pour les expériences, on peut remplacer les courbes concentriques dont je viens de parler par des spirales ; nous reviendrons sur ce sujet quand nous aurons besoin d'imiter les effets du pôle d'un aimant ; mais elle peut déjà servir à expliquer la rotation continue d'un conducteur vertical soumis à l'action d'un aimant vertical. En effet, soit PA (fig. 57) le fil conjonctif supposé vertical, $bb'd$ la section d'une des couches de l'aimant ; si l'on prend deux points b et b' symétriquement placés de part et d'autre du plan vertical projeté

en CA, un point quelconque du conducteur AP éprouvera de b et b' des actions égales; mais en sens contraires, les composantes de ces actions dirigées dans le plan vertical se détruiront donc, et les composantes horizontales s'ajouteront; le fil PA devra donc se mouvoir dans un cercle autour du centre C. Chaque couche de l'aimant produisant un effet du même genre, la résultante de toutes les actions sera à chaque instant une force perpendiculaire à la direction de la ligne CA, et produira la révolution du conducteur autour d'un aimant parallèle à ce conducteur.

§ 76. Si l'on dispose des aimans (fig. 35) sous le conducteur mobile (fig. 19), comme les rais d'une roue, les pôles de même nom tournés vers l'axe de l'appareil, les courans à leur surface supérieure seront tous dirigés dans le même sens et devront produire alors le mouvement circulaire continu que l'on a obtenu avec un conducteur plié en spirale. En effet, l'expérience démontre le fait suivant :

On obtient le mouvement circulaire continu dans un conducteur vertical, avec des aimans horizontaux dont les pôles de même nom sont tournés vers l'axe de rotation. Si cette substitution des spirales aux sections perpendiculaires à l'axe d'un aimant est fondée, un aimant doit tourner autour de son axe dans les circonstances

où l'on a obtenu le même mouvement d'une spirale galvanique (§ 15). *En effet, un aimant vertical soumis à l'action de courans horizontaux qui convergent vers son centre, ou qui en divergent, tourne sur son axe toujours dans le même sens.*

Pour observer le mouvement d'un aimant soumis à l'action des conducteurs voltaïques, on se sert d'un aimant cylindrique AB (fig. 53), terminé par deux vis creuses c, c', à chacune desquelles peut s'adapter alternativement un contre-poids en platine Q, assez long pour maintenir l'aimant vertical quand on le plonge dans le mercure. Celui-ci est contenu dans une éprouvette à pied MXY (fig. 54) dans laquelle plonge un anneau en cuivre HI soudé à l'extrémité d'une tige de cuivre recourbée GFE, qui porte à son extrémité une coupe métallique O pleine de mercure : une seconde tige métallique A'B'P glissant à frottement dans un bouchon de liége U, et portant à son extrémité inférieure une coupe A', se termine à son autre extrémité par une pointe P située dans le prolongement de l'axe du vase. En faisant glisser la tige métallique dans le bouchon U, on peut à volonté élever ou abaisser la pointe P. Un tasseau de bois R sert à soulever l'éprouvette : on met du mercure dans la vis creuse qui est à l'extrémité A de l'aimant, et on établit les com-

munications en plongeant le rhéophore positif dans A′ et le rhéophore négatif dans O. Alors le courant descend dans l'axe de l'aimant, rayonne sur la surface du mercure vers l'anneau de cuivre et sort par le fil GE. Tous les courans rectilignes vont donc en s'éloignant des courans circulaires qui ont lieu dans chaque particule de la surface de l'aimant, et d'après ce qui a été prouvé (§ 15), ils tendent à faire marcher la particule dans le sens de son courant, et par conséquent à faire tourner l'aimant dans le sens des courans qui ont lieu à sa superficie. L'analogie de cette expérience avec celle du (§ 15) devient plus frappante si l'on applique à toutes les couches concentriques de l'aimant les raisonnemens que je viens de faire pour la couche superficielle. Soient M*m*P (fig. 55), un des courans rayonnans de l'axe de l'aimant à la circonférence M*f* de l'anneau, T*eme′*, la section d'une des couches de l'aimant par le plan de niveau du mercure, le courant M*m* attirera toutes les molécules situées dans la partie *me′*, et repoussera toutes les molécules de l'aimant situées du côté *me*, l'ensemble de ces deux forces donnera, à cause de la symétrie de la figure, une résultante perpendiculaire à M*m* et dirigée dans le sens *e′e*, et fera, par conséquent, tourner l'aimant en sens contraire des courans particulaires. Le sens du mouvement change quand on renverse

les pôles de l'aimant ou l'ordre des communications avec la pile.

§ 77. On peut se servir du même appareil pour faire tourner un aimant autour d'une ligne parallèle à son axe et extérieure au barreau; pour cela on plonge le fil conducteur qui part du pôle positif dans la coupe A', et la pointe P dans le mercure de l'éprouvette; il s'établit à la surface du mercure un grand nombre de courans qui partent du centre pour aller à la circonférence. On peut les diviser en trois espèces relativement à l'aimant sur lequel ils agissent. Les uns sont tangens à sa circonférence, d'autres le traversent, les troisièmes ne le rencontrent pas. Examinons maintenant l'action de chaque espèce de courans dans le plan de niveau du mercure. Soit efe' (fig. 58), la section de l'anneau HI (fig. 54), P le point d'où partent tous les courans, et PT, PT' les deux courans tangens à l'aimant dont la section est représentée par $tmm't'n'n$, et dont je supposerai que le pôle austral est tourné vers le fond de l'éprouvette; le courant PT' attire la partie de chacun des courans appartenant aux particules de l'aimant qui tourne sa convexité vers ce courant, puisque le mouvement de l'électricité y a lieu dans le même sens. Le même courant PT' repousse l'autre partie de chacun des courans de l'aimant, mais avec une intensité moindre à cause de la

plus grande distance. Au contraire, le courant PT repousse la partie la plus voisine de chaque courant de l'aimant, et attire la plus éloignée. Il résulte donc de ces diverses actions deux forces égales, l'une attractive, dirigée suivant At', l'autre répulsive dans le sens tA, et ces deux forces se combinent en une seule perpendiculaire à PA, dans le sens Av. Les mêmes raisonnemens sont exactement applicables aux courans extérieurs Pe, Pe'. Ces courans, pris deux à deux symétriquement, donnent naissance à une force résultante dirigée suivant Av. Quant aux courans qui traversent l'aimant, on peut les partager chacun en trois portions : l'une du point P à l'aimant, la seconde dans l'intérieur de l'aimant, la troisième depuis l'aimant jusqu'à l'anneau efe'. La seconde portion sera sans effet parce qu'elle ne produira que des attractions ou des répulsions réciproques entre les particules de l'aimant, et que de pareilles forces ne peuvent lui imprimer aucun mouvement. Quant à la première portion Pn et à la troisième mM, en examinant l'action qu'elles exercent sur les courans des particules de l'aimant, on voit aisément qu'il en résulte, encore dans la même direction, une force unique perpendiculaire à PM ; un courant PM' placé symétriquement de l'autre côté de PN produira une force égale qui sera de même perpendiculaire à sa di-

rection, et ces deux forces se combineront en une seule dirigée suivant Av; l'ensemble de tous les courans horizontaux fera donc mouvoir l'aimant suivant Av. Des effets semblables se reproduisant dans chaque position successive de l'aimant, celui-ci tournera autour du point P, parce que la vitesse acquise sera à chaque instant détruite par la résistance du mercure.

Le courant vertical descendant DP (fig. 54) exerce un autre genre d'action beaucoup plus faible à la vérité et le plus souvent détruit par le frottement du mercure, mais dont on obtient parfois quelques indices dans les expériences. Ce courant attire la partie de chacun des courans de l'aimant, dont la direction, dans le sens *tn* (fig. 9), converge avec le courant descendant DP, et en repousse la partie opposée; il en résulte dans l'aimant une tendance à tourner dans le sens $tn\,n't'$, et une nouvelle force qui s'ajoute à celle des courans horizontaux émanés du point P.

D'après ce qui précède, le mouvement de translation de l'aimant aura toujours lieu tant que cet aimant ne sera traversé que par des courans qui entrent d'un côté et sortent de l'autre; mais si on les rendait tous affluens dans l'aimant, ou qu'ils en sortissent tous, il n'en résulterait plus qu'un mouvement de rotation de l'aimant sur lui-même, comme nous l'avons observé précédemment.

§ 78. On peut aussi obtenir le mouvement de rotation d'un conducteur voltaïque sur son axe. Pour le produire avec le même appareil, il faut que le pied EF (fig. 54) de la potence EFG se continue par une colonne en verre FL qui porte une tige horizontale de cuivre KL, à laquelle est attachée la boîte K, destinée à recevoir l'aimant cylindrique cc' de la figure 53, de manière que le centre de cette boîte se trouve dans la verticale passant par le point P; on y fixe l'aimant cc' par la vis de pression V. Avant de placer l'aimant dans cette boîte, on remplace le contre-poids de platine Q par un cône d'acier RT (fig. 53) qui porte en T une vis semblable à celle du contre-poids, et qui s'adapte à la même cavité c' de l'aimant : comme la vis du cône n'atteint pas le fond de cette cavité, il y reste la place de quelques gouttes de mercure qu'on a soin d'y introduire avant que d'y adapter le cône, pour que la communication soit plus complète entre ce cône et l'aimant que le courant électrique doit parcourir successivement. L'extrémité c' de l'aimant qui porte le cône étant ensuite tournée en bas, on met un peu de mercure dans la cavité c de l'autre extrémité, et on y fait plonger la pointe P du conducteur ABDP, comme on le voit dans la fig. 60. On place alors sous l'aimant un conducteur de cuivre NN' (fig. 60), dont l'extrémité inférieure porte un contre-poids de platine Q,

et la partie supérieure une petite coupe UV, dans laquelle on met un peu de mercure où vient plonger la pointe R du cône. Ce conducteur flotte sur le mercure de l'éprouvette XMY, comme l'aimant dans l'expérience précédente; et lorsqu'on met les coupes O et A′ (fig. 54) en communication avec les deux extrémités d'une forte pile, on le voit tourner sur lui-même par l'action de l'aimant *cc′*, surtout si l'on a soin de diminuer le frottement du mercure de l'éprouvette contre la surface extérieure du conducteur par de petites secousses données à l'appareil.

On rend ce mouvement de rotation plus rapide et plus aisé à obtenir sans employer une pile aussi forte, en remplaçant le conducteur par un tube de cuivre; sa masse étant alors réduite à peu de chose, celle du contre-poids de platine doit être diminuée dans la même proportion. La cause de ce mouvement de rotation que M. Ampère a obtenu le premier, est évidente quand on fait attention que le conducteur NN′ (fig. 60) ne doit pas être considéré comme conduisant seulement l'électricité suivant une droite sans épaisseur, mais comme un faisceau d'autant de courans électriques qu'il contient de séries de particules parallèles à son axe : on voit alors que cette expérience rentre dans celle où l'aimant imprime au conducteur le mouvement de révolution continu, tandis

que, quand c'est l'aimant qui est mobile, le mouvement de révolution et celui de rotation ne peuvent être assimilés, mais doivent être expliqués séparément, comme je l'ai fait plus haut.

En ajoutant à cet appareil un bout de tuyau de cuivre ABCD (fig. 59), qui s'adapte à frottement dans le cercle de cuivre HI (fig. 54), et qui porte près de son ouverture supérieure un diaphragme en verre EF (fig. 59), on a une disposition très commode pour répéter l'expérience de sir H. Davy sur la rotation du mercure. On place d'abord ce tuyau dans l'anneau HI (fig. 54) de manière qu'ils communiquent entre eux, soit par simple contact, soit en plongeant tous deux dans le mercure de l'éprouvette XMY; on met ensuite, dans la partie du tuyau ABCD (fig. 59) qui est au-dessus du diaphragme EF, une couche de mercure de peu d'épaisseur; on y fait plonger la pointe du cône TR (fig. 53) qui a été adaptée à l'extrémité inférieure de l'aimant cc'; et les communications étant établies comme lorsqu'il s'agissait de faire tourner le conducteur NN' (fig. 60), on voit le mercure tourner de même autour de la pointe du cône par l'action de l'aimant.

Dans toutes ces expériences, on change le sens des mouvemens en renversant les pôles soit de l'aimant, soit de la pile, et par conséquent le

mouvement reprendrait sa direction primitive si l'on faisait à la fois ces deux changemens.

§ 79. L'expérience de sir Humphry Davy peut s'énoncer de la manière suivante : *Un courant ou une masse de courans qui rayonnent d'un même point tournent autour de ce point par l'action d'un aimant.*

Pour faire cette expérience avec des courans galvaniques moins intenses, on fait plonger les deux fils de la pile dans une soucoupe XY (fig. 55) dont le fond est couvert de mercure, et on présente verticalement entre les deux fils et au-dessus du mercure un aimant ou un faisceau d'aimans. Alors si l'aimant est au-dessus d'un des points de communication, les courans rectilignes qui partent de ce point et les courans dans l'aimant exercent l'un sur l'autre la même action que dans la rotation de l'aimant (§76) ; mais dans celle-ci l'aimant étant mobile, il a tourné sur son axe, le mercure a bien dû prendre un mouvement en sens contraire, puisque la réaction est toujours égale à l'action, mais ce mouvement était très lent et difficile à observer à cause de la faiblesse de l'aimant qui le produisait. Ici, au contraire, l'aimant est fort et immobile, et l'action mutuelle de cet aimant et des courans ne peut se manifester que par le mouvement du mercure; celui-ci doit donc se mouvoir autour du point de diver-

gence des courans. On rend ce genre de mouvemens plus facile à observer en versant sur le mercure un peu d'eau acidulée. L'action de l'acide développe des bulles de gaz qui altèrent l'homogénéité de la surface du mercure. Le mouvement des courans change de direction quand on renverse les communications avec la pile, il en résulte que, si l'on rapproche les deux points d'immersion des fils dans le mercure assez près pour pouvoir les soumettre à l'action d'un même aimant, par exemple, à un ou deux pouces, les bulles situées vers le milieu de la ligne qui joint ces deux points sont portées dans une direction rectiligne perpendiculaire à cette ligne, comme les métaux qui passent entre les deux cylindres d'un laminoir. Cette manière est la plus commode pour juger la direction des mouvemens circulaires autour de chaque point d'immersion. La direction change quand on renverse les pôles du faisceau ou les communications avec la pile; elle change encore quand on présente le même pôle au mercure d'abord en-dessus et ensuite en-dessous.

§ 80. M. Faraday, qui, le premier, a fait connaître le mouvement de rotation continu d'un fil vertical soumis à l'action d'un aimant aussi vertical, a répété l'expérience de la rotation d'un aimant sur son axe avec un appareil qui semble, au premier coup-d'œil, la mettre en opposition avec

les résultats du calcul. Un fil conducteur LOM (fig. 56), plié en fer à cheval et mobile autour de la verticale KO, communique, par son milieu O, avec une des extrémités de la pile que je supposerai l'extrémité positive pour fixer les idées ; il plonge en L, M, dans le mercure que contient le vase CDEF ; dans la même verticale KO se trouve l'axe d'un aimant flottant AB, chargé en B d'un poids de platine BT destiné à maintenir cet aimant dans une situation verticale.

Les choses ainsi disposées, voyons d'abord ce qui doit arriver d'après la théorie : un des faits généraux les plus importans sur lesquels elle repose, et qui a suggéré à M. Ampère l'expérience et les calculs d'après lesquels il a déterminé, dans un Mémoire qu'il a lu à l'Académie des Sciences, le 10 juin 1822, ce qui restait d'indéterminé dans la formule par laquelle il a représenté l'action qu'exercent l'une sur l'autre deux portions infiniment petites de courans électriques, fait déjà annoncé dans sa Note, lue à la séance publique du 8 avril de la même année, consiste en ce que l'action mutuelle de deux circuits fermés ne peut imprimer à l'un de ces circuits un mouvement de rotation continue, toujours dans le même sens, et qu'ainsi celle de deux assemblages de circuits fermés de quelque manière qu'ils soient disposés, ne peut jamais produire cette sorte de mouvement.

Il ne peut en résulter, dans l'un d'eux, qu'une tendance à prendre une position fixe lorsqu'on le suppose mobile, d'où il suit que si un tel assemblage ne peut que tourner autour d'un axe et que les circuits dont il se compose soient situés symétriquement des deux côtés de cet axe, il n'éprouvera absolument aucune action de la part d'un circuit fermé ou d'un assemblage de circuits fermés. C'est le cas d'un aimant assujetti à ne pouvoir que tourner autour de son axe, lorsqu'on le considère comme devant ses propriétés à des courans électriques, et c'est pourquoi on ne peut d'aucune manière lui imprimer un mouvement autour de son axe par l'action d'autres aimans.

Il semble même, au premier coup-d'œil, à cause de la disposition symétrique de tous les courans d'un aimant relativement à son axe, qu'il est également impossible de le faire tourner autour de cet axe par l'action d'un conducteur voltaïque, puisque les courans de la pile agissent comme ceux des fils conducteurs, et que la pile, réunie à tout le reste du courant électrique qu'elle produit, compose toujours un circuit complètement fermé. C'est en effet ce qui a lieu tant qu'aucune partie de ce dernier circuit ne traverse l'aimant ou n'est liée invariablement avec lui ; nous verrons tout à l'heure pourquoi le mouvement de rotation

continue, autour de l'axe même de l'aimant, devient possible dans cette dernière circonstance; il faut auparavant examiner toutes les actions qui s'exercent dans l'appareil représenté figure 56 lorsque l'aimant AB n'est lié à aucune partie du circuit voltaïque composé du conducteur mobile LOM, du mercure contenu dans le vase CDE, des deux rhéophores RP, SN, et de la pile PN.

Puisque le courant voltaïque va en s'approchant de ceux de l'aimant dans les branches OL, OM, elles tendent à tourner autour de lui dans le sens opposé à la direction de ces derniers, et il en résulte une réaction sur l'aimant tendant à le faire tourner avec une force égale en sens contraire, c'est-à-dire dans le sens de ses propres courans; les courans qui des points L, M passent dans le mercure, vont au contraire en s'éloignant de ceux de l'aimant, leur action tend donc à faire tourner le mercure autour de lui dans le sens de ses courans, conformément à l'expérience de sir H. Davy relative à la rotation du mercure, et il en résulte une réaction sur l'aimant qui tend à le faire tourner en sens contraire; enfin, le reste du courant électrique contenu dans les rhéophores et la pile agit pour faire tourner l'aimant avec une force égale à la différence des deux actions du fer à cheval LOM et du mercure, puisque l'action

totale de tout le circuit voltaïque doit être nulle.

Il suit de là que quand rien ne s'oppose à la rotation du fer à cheval LOM, il tourne en sens contraire des courans de l'aimant AB, que si l'action est assez forte pour vaincre l'inertie du mercure et les frottemens, le mercure tourne aussi, mais dans le sens de ses courans, tandis qu'il ne peut y avoir aucune action pour faire tourner l'aimant, tant qu'on ne le lie à aucune partie du circuit.

Mais si l'on vient à lier l'aimant à la partie mobile LOM, ou qu'on y fasse passer une portion du courant, comme dans l'expérience (§ 76), alors toute action mutuelle entre les élémens d'un système de forme invariable ne pouvant lui imprimer aucun mouvement, ce sera comme si l'on avait supprimé du circuit total la portion de ce circuit qui fait corps avec l'aimant; et comme c'était l'action de cette portion qui faisait équilibre à l'action égale et opposée du reste du circuit, celle-ci aura tout son effet et l'aimant tournera en vertu de cette dernière action. Quant au mercure contenu dans le vase CDEF, sa tendance à tourner sera la même dans les deux cas, et elle aura ou n'aura pas son effet, suivant que cette force sera ou ne sera pas suffisante pour vaincre les résistances qui s'opposent à la rotation du mer-

cure. Il est aisé de voir que tout, dans cette expérience, se passe comme dans celle de M. Savary (§15), le mercure y est seulement remplacé par de l'eau acidulée, et l'aimant par une spirale électro-dynamique, qui doit, d'après la théorie, agir précisément comme lui. Il est à remarquer que l'action du reste du circuit, qui produit alors la rotation de l'aimant, étant égale et opposée à celle que LOM exerçait sur lui avant qu'on les liât, et celle-ci étant aussi égale et opposée à l'action qu'exerçait en même temps l'aimant pour faire tourner LOM, la force qui tend à faire tourner, dans le premier cas, l'aimant et le fer à cheval réunis est de même intensité et de même signe que celle qui tend à faire tourner, dans le second, le fer à cheval seulement; mais le mouvement de rotation doit parvenir plus lentement à l'état uniforme lorsque l'aimant et le fer à cheval sont liés ensemble, parce que la masse à mouvoir est augmentée de toute celle de l'aimant, et la vitesse doit même rester toujours un peu moindre à cause du frottement entre le mercure et la surface de l'aimant. Il est aisé de voir que cette sorte de mouvement n'aurait pas lieu dans le cas où la portion mobile du circuit voltaïque qu'on lie avec l'aimant, ou la portion du courant de ce circuit qui passe par l'aimant dans l'appareil (fig. 54), aurait ses deux extrémités dans l'axe, puisqu'il n'y a

point d'action entre un aimant et un courant électrique terminé de part et d'autre à l'axe de cet aimant. On voit aisément, à l'aide du calcul, que la force qui produit ce mouvement est à son maximum quand la distance des points L et M diffère peu du diamètre de l'aimant.

§ 81. Dans tout ce qui précède, je me suis attaché à montrer que l'on peut imiter les effets des aimans par des courans électriques qui suivent différens systèmes de courbes fermées. Ainsi, on a imité la direction d'un aimant par la terre avec des hélices ou des spirales électriques, les attractions et répulsions des aimans entre eux par les attractions et répulsions des hélices, etc. On peut de même imiter le fait de la direction de l'aiguille astatique (fig. 42), en se servant d'un conducteur (fig. 64) composé de deux parties verticales $\gamma'\alpha$ et $\gamma\mu$ et de deux courbes $\alpha\beta\gamma\lambda\mu$ et $\varepsilon\theta\eta$ parcourues en sens contraire; chacune de ces courbes représente une section faite dans les deux aiguilles AB et A'B' (fig. 42), par un plan vertical passant par l'axe de suspension et perpendiculaire aux axes des aiguilles. Si l'on présente une portion rectiligne quelconque du circuit voltaïque entre les deux courbes, le système se tourne parallèlement au conducteur rectiligne de manière que $\beta\lambda$ et $\theta\varepsilon$ soient parcourus par l'électricité dans le même sens que le conducteur fixe.

§ 82. On peut soumettre la théorie des courans particulaires à une épreuve plus décisive que ces imitations toujours grossières. Il suffit de se rappeler ce que le calcul a fait connaître sur l'action mutuelle des différens systèmes de courans électriques, et de comparer chaque résultat avec des expériences faites directement sur les diverses formes d'aimans dont les courans électriques représentent la constitution. Les résultats déduits de la formule qui représente l'action mutuelle de deux élémens de courans électriques, sont consignés dans la seconde partie de cet Ouvrage, § 32 et suivans. J'examinerai ici successivement tous ceux qui peuvent se vérifier par expérience.

L'action d'un conducteur rectiligne indéfini ou d'un courant circulaire sur un élément de courant situé d'une manière quelconque dans l'espace, est perpendiculaire à ce petit courant (§ 32).

Nous avons vu en effet (§ 43), que l'action de la terre sur un courant rectiligne est perpendiculaire à ce courant; résultat qui confirme ce que nous avons énoncé, que la terre agissait comme un courant circulaire situé dans le plan de son équateur magnétique. Mais ce courant à cause de la grandeur de son rayon, peut aussi être considéré comme n'agissant que par sa partie la plus voisine du conducteur soumis à son action, et il

est aisé de voir que cette partie la plus rapprochée, n'est autre chose qu'un courant rectiligne indéfini, perpendiculaire au méridien magnétique du lieu de l'observation ; on doit donc lui trouver les propriétés des courans indéfinis.

Lorsqu'un courant qui suit une courbe plane quelconque, est soumis à l'action d'un courant indéfini dans les deux sens, et se meut autour d'un axe perpendiculaire au plan de la courbe et à la direction du courant indéfini, le moment des forces qui sollicitent le conducteur est le même dans toutes les positions (§ 32).

Ce théorème explique pourquoi dans l'expérience (§ 37) deux conducteurs horizontaux parcourus en sens contraires par l'électricité, et assujettis à tourner autour d'un axe commun vertical, restent en équilibre sous l'influence terrestre, quel que soit l'angle formé par leurs directions. En effet, la verticale étant en même temps perpendiculaire au courant indéfini et aux plans dans lesquels se meuvent les conducteurs mobiles, tout le système est dans les circonstances que suppose le calcul.

Plusieurs des théorèmes auxquels on est parvenu, sont relatifs aux cylindres électro-dynamiques qui imitent les aimans cylindriques ; si cette imitation est exacte, les aimans doivent jouir de toutes les propriétés que le calcul a fait dé-

couvrir dans les cylindres; *or, l'action d'un cylindre électro-dynamique sur un conducteur indéfini perpendiculaire à son axe, se réduit à deux forces dirigées dans un même plan perpendiculairement aux lignes qui mesurent les distances du courant indéfini aux deux extrémités du cylindre, et en raison inverse de ces distances* (§ 32). Dès l'année 1820, M. Biot avait déduit des nombres d'oscillations faites par une aiguille aimantée soumise à l'influence d'un fil indéfini perpendiculaire à son axe, que l'action mutuelle de ces deux corps était représentée par deux forces perpendiculaires aux lignes qui mesurent les distances des deux pôles de l'aimant au fil, et en raison inverse de ces distances. M. Pouillet, par une nombreuse suite d'expériences consignées dans un Mémoire lu à l'Institut le 26 août 1812, a confirmé la même loi en prouvant qu'on pouvait la déduire également des oscillations d'une aiguille horizontale ou des positions d'équilibre qu'elle prend sous l'influence d'un fil vertical. Il a suivi cette loi dans ses conséquences, et a montré que non-seulement elle satisfaisait aux phénomènes déjà connus, mais encore qu'elle pouvait servir à en prévoir de nouveaux. Les principales conséquences qu'on en peut déduire sont le mouvement de révolution continue d'un courant vertical sollicité par un aimant horizontal, comme

M. Faraday l'a découvert le premier, et l'existence d'une courbe limite qui jouit de la propriété que si une aiguille aimantée est attirée par un fil conducteur, quand elle est à l'intérieur de cette courbe, elle en est repoussée quand elle passe à l'extérieur; or, on peut voir dans la seconde partie (§ 35) comment toutes ces circonstances dérivent de la loi trouvée expérimentalement sur les aimans, et par le calcul sur les cylindres électro-dynamiques. On y verra de plus un nouveau théorème qui pourra servir encore à confirmer cette loi; il consiste en ce que *le mouvement de rotation continue du conducteur, se change en une position d'équilibre fixe lorsque les pôles de l'aimant sont tous deux en dedans ou tous deux en dehors du cercle décrit par le courant mobile.* L'expérience n'a pas encore été faite et présente des difficultés, parce que l'affaiblissement graduel du moment de rotation, lorsque les deux pôles s'approchent de la position qui doit le rendre nul, joint aux résistances qu'il est impossible d'éviter, fera toujours cesser le mouvement de révolution avant l'instant indiqué par le calcul, et d'autant plus tôt que le courant électrique sera plus faible.

L'action d'un cylindre électro-dynamique d'un très petit diamètre sur un élément de courant, se réduit à deux forces perpendiculaires à deux plans qui passent tous deux par cet élé-

ment et chacun par l'une des extrémités de l'axe du cylindre. Chaque force est en raison inverse du carré de la distance de l'élément à l'une des extrémités de l'axe du cylindre, et proportionnelle au sinus de l'angle que la droite qui joint l'élément et cette extrémité fait avec la direction du même élément. D'où il suit que, si l'on suppose le cylindre électro-dynamique d'une longueur infinie, son action sur un élément de courant électrique ne dépend que de la position respective de l'élément et de l'extrémité du cylindre que l'on considère, mais nullement de la direction de l'axe du cylindre dans l'espace. Il en est de même de l'action du même cylindre sur un conducteur d'une forme et d'une grandeur quelconques. Cette action ne dépend que de la position de l'extrémité que l'on considère, relativement au conducteur, et reste la même, quelle que soit la direction de l'axe du cylindre (§ 32).

Les mêmes propriétés doivent appartenir à un aimant; or, un aimant horizontal fait tourner un conducteur vertical d'un mouvement continu lorsqu'un des pôles est à l'intérieur, ou mieux au centre, du cercle que peut décrire le conducteur mobile; si l'aimant était assez long pour qu'on pût négliger le rayon du cercle par rapport à la distance des deux pôles, l'effet devrait rester le même lorsque l'axe de cet aimant tournant au-

tour de son pôle comme centre, se dirigerait d'une manière quelconque dans l'espace. Dans la pratique on ne peut pas avoir d'aimant aussi long que le suppose ce calcul; mais comme l'effet n'est pas susceptible de mesure, un aimant d'une grandeur beaucoup moindre pourra servir à faire l'expérience, parce que le mouvement de révolution subsiste encore, mais avec un moment de rotation variable, lors même que l'aimant est réduit à trois ou quatre fois la longueur du cercle, et le mouvement étant promptement ramené à l'uniformité par la résistance des liquides, l'effet apparent est toujours le même. L'expérience confirme cette loi; soit un conducteur LOM (fig. 62), mobile sur un axe vertical OK passant par son centre et mis en communication avec la pile, de manière que le rhéophore positif, par exemple, plonge dans la coupe R et le rhéophore négatif dans la coupe S, soudée au vase métallique COEF; ce conducteur tournera d'un mouvement continu par l'action d'un aimant, non-seulement dans la position horizontale AB, mais encore lorsque l'aimant deviendra vertical AB′, ou sera incliné d'une manière quelconque AB″. Cette expérience présentée par M. Barlow comme une objection contre la théorie électrique, en est au contraire une conséquence nécessaire, mais qu'il était impossible de démontrer sans le secours du calcul.

Si dans l'équateur d'une sphère on conçoit un cercle d'un petit rayon dont le centre se confonde avec celui de la sphère, et qu'un cylindre électro-dynamique très court soit transporté successivement sur tous les points de la surface de cette sphère, l'axe du cylindre étant toujours dans le méridien, la tangente de l'angle formé par l'axe du cylindre et le plan tangent à la sphère est double de la latitude du point que l'on considère (§ 32).

Il est facile de voir que ce théorème donne la loi de l'inclinaison magnétique sous la forme découverte par M. Bowditch; que la tangente de l'inclinaison est double de la latitude magnétique; il suffit pour cela de supposer que les courans terrestres forment un cercle dont le centre se confond avec celui du globe, et dont le rayon est très petit par rapport à celui de l'équateur; ce qui n'empêche pas qu'il ne puisse encore être très grand par rapport à tous nos appareils. Cette hypothèse est parfaitement analogue à celle par laquelle on représente l'action de la terre dans la théorie des deux fluides magnétiques. MM. Biot et de Humboldt ont fait voir que dans cette théorie il fallait admettre deux centres d'action, l'un boréal, l'autre austral, très près du centre de la terre.

L'action exercée sur un conducteur indéfini par une surface annulaire dont l'axe est une

courbe plane quelconque, symétrique par rapport à un diamètre, est dirigée dans ce diamètre toutes les fois que le courant indéfini passe par un point de cette ligne et est perpendiculaire au plan de l'axe de la surface (§ 32).

Ce théorème s'applique aux aimans en fer à cheval que l'on trouve dans tous les cabinets de Physique; je l'ai vérifié avec M. Ampère en présentant horizontalement un fer à cheval vers le milieu d'une des branches verticales des conducteurs (fig. 19 et 21); expérience qui nous a conduits aux résultats suivans, entièrement conformes au théorème donné par le calcul pour les surfaces annulaires.

Un conducteur vertical mobile autour d'un axe vertical et soumis à l'action d'un aimant en fer à cheval dont le diamètre rencontre l'axe de rotation, est constamment amené dans une des positions où il coupe ce diamètre. Des deux positions qui satisfont à cette condition, l'une est toujours d'équilibre stable, et l'autre d'équilibre instantané, en sorte que dans le cas d'attraction le conducteur vient le plus près possible de l'aimant, et dans le cas de répulsion, il s'en éloigne autant que le permet son mode de suspension. On fait passer le conducteur d'une position à l'autre en changeant le sens du courant ou en retournant l'aimant de manière que sa partie inférieure de-

vienne supérieure, soit enfin en présentant à l'axe de rotation d'abord la concavité, et ensuite la convexité du fer à cheval.

Un anneau de petits courans électriques circulaires est sans action à toute distance sur un conducteur voltaïque de forme quelconque (§ 32).

MM. Welter et Gay-Lussac avaient reconnu depuis long-temps que si l'on aimantait un anneau d'acier par un procédé que nous ferons bientôt connaître, les propriétés magnétiques restaient dissimulées tant que l'anneau était dans son entier; mais que si on venait à le rompre en un point quelconque, chaque fragment avait deux pôles, et jouissait de toutes les propriétés des aimans ordinaires. Cette expérience curieuse suggéra l'idée de soumettre au calcul le système d'un grand nombre de petits courans circulaires situés dans des plans perpendiculaires à celui d'un autre cercle qui passe par les centres de tous les petits courans; car il est évident qu'un pareil système, auquel on a donné le nom d'*anneau électro-dynamique*, doit dans la théorie électrique jouir de toutes les propriétés de l'anneau magnétique de MM. Gay-Lussac et Welter. Le calcul a parfaitement confirmé cette opinion comme on le voit par le théorème cité. Le même théorèmc a servi à déterminer les constantes qui entrent dans la formule par laquelle M. Ampère a représenté l'ac-

tion mutuelle de deux élémens de courans électriques, et à les déterminer par des expériences entièrement indépendantes des propriétés des aimans (§ 33).

M. Biot avait imaginé de plier le courant indéfini à l'action duquel il soumettait une petite aiguille aimantée ; et en observant le nombre d'oscillations de l'aiguille, il avait donné comme une approximation cette loi, que l'action exercée sur une aiguille aimantée par un fil conducteur plié dans un plan vertical, passant par le centre de l'aiguille, est proportionnelle à l'angle formé par les deux parties du fil. M. Savary, en soumettant cette action au calcul, a trouvé que la force est proportionnelle à la tangente du quart de l'angle formé par les deux fils, loi qui diffère peu de la précédente.

Enfin, *l'action mutuelle de deux cylindres électro-dynamiques peut toujours être représentée par quatre forces agissant en raison inverse du carré de la distance, et dirigées suivant les lignes qui joignent deux à deux les extrémités des cylindres, du moins quand les distances ne sont pas très petites* (§ 32).

En substituant des aimans aux cylindres électro-dynamiques et les pôles des aimans aux extrémités des cylindres, on voit que ce théorème exprime exactement la loi à laquelle Mayer, Lambert

et Coulomb sont parvenus par des procédés différens, pour représenter l'action mutuelle des aimans.

§ 83. L'action des courans électriques ne s'exerce pas seulement sur les aimans naturels ou artificiels; elle a encore lieu sur le fer doux et l'acier non aimanté, auxquels M. Arago a découvert qu'elle communique les propriétés magnétiques. Nous exposerons dans les articles suivans les principaux résultats de ses recherches sur ce sujet. Il observa d'abord[1], qu'*un fil conducteur parcouru par l'électricité attire la limaille de fer; il perd cette propriété aussitôt que ses communications avec la pile sont interrompues.*

Si le fil est simple, l'expérience ne peut réussir qu'avec une pile très énergique; mais on augmente considérablement cette attraction en donnant au conducteur la forme d'une spirale (fig. 63). En faisant communiquer les deux extrémités r et r' de ce conducteur avec les deux rhéophores d'une pile galvanique, et appliquant le plan de la spirale sur une feuille de papier couverte de limaille de fer, on voit celle-ci s'attacher au conducteur, et y former des aigrettes comme au pôle d'un aimant. Si l'on rompt la communication, la limaille retombe et s'attache de nouveau à la courbe lorsque les communications sont rétablies. La formation des aigrettes prouve que les petites parcelles de limaille qui sont immédiatement suspendues à la spirale acquièrent la propriété d'attirer

les autres parcelles du même métal; et puisque cette expérience ne peut pas réussir avec la limaille du cuivre ou de tout autre métal, on ne peut attribuer le phénomène qu'à l'aimantation des petites parcelles de fer; d'où il faut conclure que les conducteurs d'une pile galvanique ont la propriété d'aimanter la limaille de fer.

§ 84. On peut expliquer l'aimantation des parcelles de fer de deux manières; 1° en admettant que les courans électriques existent dans toutes les particules du fer dans son état naturel, mais que s'y trouvant dirigés en toutes sortes de sens, il n'en peut résulter aucune action au dehors, les uns tandant à attirer ce que les autres repoussent; comme il arrive à de la lumière dont les divers rayons étant polarisés en tous sens, ne prennent aucun signe de polarisation. S'il en est ainsi, l'aimantation doit s'opérer toutes les fois que l'action d'un aimant ou celle d'un fil conducteur vient à donner à tous ces courans une direction commune en vertu de laquelle leurs actions sur un point situé à l'extérieur du corps s'ajoutent au lieu de s'entre-détruire: cette action produit alors le même effet sur ces courans qu'on lui voit produire sur une portion mobile du conducteur, quand cette portion mobile tourne pour prendre une direction fixe

La seconde manière de concevoir l'aimantation est de supposer que les courans électriques ne pérexistent pas dans le fer, mais sont produits

par l'influence d'un autre courant ou d'un aimant. Alors le fer s'aimanterait parce qu'en présence d'un aimant ou d'un conducteur voltaïque il s'établirait des courans autour de toutes ses particules. Avant de discuter les motifs de préférence entre ces deux modes d'explication, il faut nous assurer si un courant galvanique, établi dans un conducteur, peut, par son influence, produire un courant dans un autre fil conducteur soumis à son action et qui ne communique pas avec la pile. Pour faire cette expérience, on suspend à un cordon de soie un cercle de cuivre (fig. 65); on l'entoure d'une spirale qui ne diffère de celle de la figure 18, que par les deux appendices φ et π qui sont tournés de manière que l'on peut donner à la courbe une position verticale sans interrompre les communications. On présente un aimant au cercle mobile, et l'on voit au moment où les communications sont établies, le cercle mobile tourner pour prendre une position d'équilibre comme le ferait un conducteur dans lequel le courant irait dans le même sens que la spirale. Cette expérience ayant d'abord été faite avec un courant galvanique trop faible, M. Ampère avait annoncé qu'il est impossible de produire un courant par l'influence d'un autre courant; mais l'ayant répétée avec une pile plus énergique et un aimant puissant, il a reconnu l'erreur de sa première détermination. Il

est donc constaté maintenant *qu'un courant électrique tend à mettre en mouvement dans le même sens l'électricité des conducteurs près desquels il passe.* Cela posé, notre ignorance complète sur la constitution des courans dans les particules du fer, ne nous permet pas de décider si l'aimantation des métaux est due à une véritable production de courans électriques ou à un simple changement de direction dans des courans préexistans. Cependant il est nécessaire d'observer que l'on n'a jamais pu produire un courant dans un conducteur d'une grandeur finie par l'influence d'un aimant ou d'un système d'aimans. Peut-être l'aimantation n'est-elle pas due uniquement à l'une ou l'autre des causes que j'ai indiquées, mais à toutes les deux ; de manière que l'action d'un aimant ou d'une spirale électrique sur le fer, dirigerait tous les courans des particules et augmenterait en même temps leur intensité. Sans donner sur cette question une solution qui serait prématurée, j'exposerai ici les effets de l'aimantation par les courans électriques, je les comparerai avec ce que l'expérience a fait connaître depuis long-temps sur les méthodes propres à donner une grande énergie au magnétisme, et je ferai voir que tous les résultats connus sur ce sujet peuvent se déduire facilement de la théorie des courans particulaires, et en sont autant de conséquences nécessaires.

Pour abréger les explications, je ne tiendrai compte que de la direction des courans, leur augmentation d'énergie si elle a lieu, ne faisant qu'amplifier les effets sans en changer la nature.

§ 85. *Un conducteur galvanique placé perpendiculairement à une petite aiguille d'acier faiblement trempée, lui donne une légère aimantation. Le pôle austral se forme à gauche du courant, et le pôle boréal à droite.*

Cet effet est dû à ce que les courans particulaires de l'acier sont amenés dans une situation parallèle au courant du conducteur, et tournés dans le même sens pour la partie la plus voisine du conducteur; or, si l'on se reporte à la direction des courans d'un aimant (fig. 46), il est facile de voir que pour un observateur dont la tête serait tournée vers la pointe de la flèche et les pieds du côté opposé, et qui regarderait l'axe de l'aimant, le pôle austral serait constamment à gauche. L'expérience ne réussit avec un fil droit que sur une petite aiguille peu trempée, mais on peut l'appliquer à des aiguilles de boussole ou à de petits barreaux, en remplaçant le fil droit par un courant plié en cercle et mieux encore en hélice. Dans ce dernier cas, chaque tour de l'hélice agit sur les courans particulaires du barreau placé dans son intérieur comme un courant circulaire agit sur un autre courant fermé; ils sont donc

amenés tous dans des plans parallèles et dirigés dans le même sens; le même effet se répète sur toute la longueur du barreau.

§ 86. Pour prévoir la position des pôles dans un barreau aimanté par ce procédé, il faut connaître la différence qui existe entre deux espèces d'hélices. Pour les définir, je supposerai que l'on ait devant soi un cylindre horizontal, et qu'on veuille parvenir de l'extrémité la plus près du corps à la plus éloignée, en faisant tourner la main du point le plus haut de la base du cylindre pour aller d'abord à droite, passer en-dessous du cylindre, revenir à gauche et ensuite en-dessus à une certaine distance de la base, et continuant le même mouvement toujours dans le même sens; on construit l'espèce d'hélice que les botanistes nomment *dextrorsùm*. C'est la seule employée dans les arts. Au contraire, en faisant aller la main d'abord à gauche, puis en-dessous à droite, et revenir en-dessus, on trace une autre espèce d'hélice qui ne peut jamais coïncider avec la précédente et que les botanistes nomment *sinistrorsùm*. Le pôle austral se forme toujours à gauche du courant; ainsi, avec une hélice *dextrorsùm* il se trouve vers la sortie du courant, et avec une hélice *sinistrorsùm*, il est constamment placé du côté par où le courant entre dans le conducteur.

Si l'on place à la suite l'une de l'autre deux hélices d'espèces différentes, il se forme dans l'intervalle un point conséquent.

§ 87. On peut encore aimanter un barreau en se servant d'une spirale (fig. 66), située dans un plan parallèle à l'axe du barreau. Cette expérience est importante parce qu'elle représente avec des courans l'aimantation par les extrémités des barreaux aimantés.

Dans les barreaux aimantés, l'extrémité est la section de toutes les couches concentriques par un même plan; or, quelle que soit la distribution dans chaque couche, elle diffère très peu d'une couche à l'autre; les effets produits doivent donc être ceux que l'on obtiendrait avec des courans continus qui traceraient sur la surface du barreau un système de courbes fermées, semblables entre elles et dont chacune représente toute la section d'une des couches par le plan qui termine le barreau. Le seul moyen d'imiter un pareil système avec un courant continu, est de le plier en spirale dont chaque spire imite l'intersection d'une des couches de l'aimant, comme on l'a expliqué en détail § 74.

Cela posé, si l'on met cette spirale sur un barreau, et que par le centre de la spirale on conçoive un plan perpendiculaire à l'axe du barreau, ce plan divisera la spirale en deux parties symé-

triques dans lesquelles le courant aura des directions opposées; les particules d'acier placées des deux côtés de ce plan s'aimanteront de manière que leurs courans se trouvent dirigés comme ceux des spires qui leur correspondent, c'est-à-dire en sens opposés des deux côtés du plan : il se formera, dans le point de l'axe qui correspond au centre de la spirale, un point conséquent. Substituons maintenant à la spirale le pôle d'un aimant où les courans tournent dans le même sens que dans cette spirale, de manière que son axe soit comme celui de la spirale perpendiculaire au barreau; celui-ci sera aimanté précisément de la même manière; il se formera de même un point conséquent au milieu de la partie du barreau touchée par le pôle de l'aimant, et ses deux extrémités présenteront, comme dans le cas de la spirale, un pôle de même nom que celui de l'aimant qui aura été mis en contact avec le barreau.

En faisant glisser, soit la spirale, soit l'aimant, d'une extrémité à l'autre du barreau, toujours dans le même sens, la partie de ce barreau, qui se trouvera à chaque instant du côté par où commence le mouvement, conservera ses courans dans la direction qui leur aura été donnée, mais les courans de l'autre partie du barreau seront changés en courans dans la direction opposée, à mesure que le mouvement de la spirale ou de

l'aimant les fera trouver de l'autre côté de cette spirale ou de cet aimant, en sorte que l'extrémité du barreau par laquelle aura commencé le mouvement devra présenter un pôle de même nom que celui de l'aimant, et l'extrémité par laquelle il aura fini offrira un pôle de nom contraire, ce qui est conforme à l'expérience.

Mais si le barreau est d'un acier très dur, une partie des courans qui auront d'abord reçu une direction contraire entre le point de contact et l'extrémité de ce barreau vers laquelle on porte l'aimant, pourront la conserver malgré l'aimantation en sens opposé que tendent à recevoir ensuite les points du barreau où ils existent; et alors ce barreau offrira des points conséquens, comme il arrive en effet souvent quand on emploie ce procédé d'aimantation.

Si l'on suppose qu'on incline l'aimant dont on se sert pour aimanter le barreau, on rendra l'aimantation plus facile, et on tendra à diminuer le nombre des points conséquens, pourvu que l'inclinaison ne soit pas trop grande. Pour bien concevoir cette circonstance, il faut faire attention que si d'une part on diminue l'action d'une partie des courans de l'aimant, parce qu'on les éloigne par là du barreau, cette action est augmentée pour ceux des courans qui doivent conserver leur direction dans le barreau après l'aimantation,

parce que l'angle que forment leurs plans avec ceux des courans de l'aimant, devient aigu, ce qui ne peut manquer de favoriser l'action de ces derniers; c'est précisément le contraire pour les courans en sens opposé, qui doivent changer de direction à mesure que l'aimant les dépasse en continuant son mouvement le long du barreau; ils ne peuvent que perdre de leur intensité à mesure que l'axe de l'aimant s'incline sur celui du barreau : il ne faut pourtant pas que l'angle devienne trop petit, parce qu'alors le changement de distance prenant une plus grande influence, l'action de l'aimant pour produire ou diriger les premiers courans, irait à son tour en diminuant, et le barreau s'aimanterait moins bien que quand l'aimant est médiocrement incliné sur le barreau. Il est inutile de rappeler que ces divers résultats sont tous conformes à l'expérience.

Si au lieu de promener le long du barreau un seul aimant dont l'axe fasse un angle droit avec le sien, on en emploie deux, à une petite distance l'un de l'autre, qui le touchent par des pôles de noms contraires, il est évident que d'après la manière dont les courans électriques tendent à se diriger mutuellement, les actions des courans des deux aimans se contrarieront pour tous les points du barreau situés hors de l'intervalle de ces aimans, tandis qu'elles se réuniront pour diriger

dans le même sens les courans de tous les points du même barreau situé dans cet intervalle. Les derniers courans acquérant ainsi, dans ce sens, une énergie bien supérieure à celle des premiers, conserveront seuls leur direction lorsque les aimans ayant parcouru toute la longueur du barreau, l'intervalle qui les sépare aura occupé successivement toutes les parties de cette longueur. C'est ce moyen d'aimantation qui est connu sous le nom de double touche; et il est aisé de voir que toutes les circonstances qu'il présente sont une suite nécessaire de la théorie des courans particulaires et de l'aimantation d'un barreau d'acier par un conducteur voltaïque. L'analogie de l'explication déduite de cette théorie et de celle qu'on donne de la double touche dans l'hypothèse de deux fluides magnétiques agissant d'après les mêmes lois que les deux fluides électriques, me dispense d'entrer à ce sujet dans de plus grands détails.

§ 88. M. Arago a montré par une expérience très simple que quand un barreau est aimanté sur une partie de sa longueur, cette partie tend, par son action sur le reste du barreau, à en continuer l'aimantation dans le même sens, pourvu qu'il ne soit pas d'une trempe trop dure; ce qui pourrait empêcher cet effet d'avoir lieu à cause de la difficulté d'aimanter un acier très fortement trempé;

et même dans ce cas l'aimantation est encore produite dans le même sens dans les parties voisines de la partie déjà aimantée. On s'en assure aisément en enveloppant d'un conducteur plié en hélice une partie seulement d'un fil d'acier pendant quelque temps, et en examinant ensuite l'action qu'exerce ce fil d'acier sur une petite aiguille; on trouve qu'il est aimanté dans le même sens sur une étendue qui est ordinairement à peu près double de celle qui était enveloppée par le conducteur; seulement l'intensité va en diminuant graduellement à mesure qu'on s'éloigne de la partie enveloppée. Ce fait, qui est une conséquence nécessaire et immédiate de la théorie où l'on considère les phénomènes magnétiques, comme produits par des courans électriques, s'explique également dans la théorie ordinaire de l'aimant, puisque dans un barreau aimanté en partie, chaque particule de la portion aimantée tend à décomposer le fluide de la particule suivante, de manière à lui donner des pôles situés dans le même sens que les siens, afin que les pôles voisins dans ces deux particules soient d'espèces opposées, comme cela doit être dès qu'on admet que les deux fluides magnétiques s'attirent mutuellement, et que chacun d'eux repousse les molécules magnétiques de même espèce que les siennes.

§ 89. Lorsqu'à l'extrémité d'un barreau d'acier

ou de fer, on applique le centre d'une spirale perpendiculaire à son axe, ou le pôle d'un aimant en ligne droite avec le barreau, celui-ci s'aimante dans la partie qui est voisine du point de contact, dans le même sens que l'est cet aimant, ce qui s'explique également bien dans les deux hypothèses, puisque si l'on admet dans l'aimant des courans électriques, ils doivent, d'après l'expérience de M. Arago, que nous venons de citer, diriger ceux du barreau, de manière qu'ils tournent autour de ses particules dans la même direction, et en faire par conséquent un nouvel aimant dont les pôles soient situés, l'un par rapport à l'autre, dans le même sens que ceux du premier aimant : et que si l'on attribue au contraire les phénomènes magnétiques à la séparation, dans chacune de ces particules, des deux fluides qui s'y neutralisaient auparavant par leur réunion, l'effet de l'aimant, quand il touche par exemple le barreau par son pôle austral, est d'attirer le fluide boréal de chaque particule et d'en repousser le fluide austral, en sorte que toutes les particules deviennent des aimans dont le pôle boréal est du côté de l'aimant et le pôle austral du côté opposé, de manière qu'elles se trouvent toutes aimantées dans le même sens que lui. Quelle que soit donc celle de ces deux hypothèses qu'on adopte, on en doit conclure également que la partie déjà aimantée ne

peut agir sur celle qui ne l'est pas encore que comme le fait l'aimant lui-même, puisque les pôles de cette partie sont situés dans le même sens que ceux de l'aimant; elle ne peut donc que tendre à propager successivement l'aimantation toujours dans le même sens jusqu'à l'autre extrémité du barreau ; c'est ce qui arrive en effet quand il est de fer doux, et la propagation des propriétés magnétiques le long du barreau est en général très rapide dans ce cas, parce que cette substance n'oppose qu'une très faible résistance, soit dans l'une des hypothèses à la direction des courans électriques, soit dans l'autre à la séparation des deux fluides magnétiques.

Mais lorsque le barreau est d'acier, surtout quand il est trempé de manière à ce qu'il n'acquière qu'avec difficulté les propriétés de l'aimant, on observe un phénomène très remarquable dont l'explication mérite une attention particulière. Ce phénomène consiste en ce qu'alors il se forme un point conséquent sur le barreau, et que ce barreau présente, au-delà de ce point, des pôles situés en sens opposé à celui des pôles de la partie qui est en contact par son extrémité avec l'aimant, et en a reçu une aimantation semblable à celle de cet aimant.

Il est bien démontré par l'espèce des pôles qui se développent aux extrémités des deux fragmens

d'un aimant que l'on casse, par lesquelles ces fragmens adhéraient avant la rupture, que l'hypothèse des deux fluides magnétiques ne peut subsister qu'en admettant, comme l'a établi le célèbre Coulomb, que ces deux fluides ne passent jamais, ainsi que le fait l'électricité, d'une particule à l'autre, et que tous les phénomènes magnétiques sont dus à leur séparation dans une même particule, en sorte qu'un aimant n'est qu'un assemblage d'autant de petits aimans qu'il contient de particules, dont chacun a un pôle austral et un pôle boréal. Il est évident alors que, quand un barreau a été aimanté sur une partie de sa longueur par le contact d'une de ses extrémités avec un aimant, la partie aimantée l'étant dans le même sens que cet aimant, elle ne peut agir que comme lui, et qu'elle joint nécessairement son action à la précédente pour propager l'aimantation le long du barreau, toujours dans le même sens; à quoi peut-on donc attribuer, dans cette supposition, la production d'un point conséquent et l'aimantation en sens contraire de la partie du barreau située au-delà de ce point?

Il paraît d'abord qu'on tombe dans le même inconvénient lorsqu'on attribue les phénomènes magnétiques aux courans électriques qui s'établissent dans le barreau; car lorsqu'il n'y a encore qu'une partie du barreau où les courans soient

dirigés dans le même sens, ces courans doivent tendre à donner, de proche en proche, la même direction aux courans du reste du barreau. Pour voir comment il peut arriver, par la difficulté que ceux-ci éprouvent à changer de direction dans l'acier fortement trempé, qu'il se forme un point conséquent, et qu'au-delà de ce point les courans tournent dans le sens opposé, considérons les trois barreaux AB, A′B′, A″B″ (fig. 67), et supposons que le premier seul soit aimanté, et qu'en les laissant dans les directions où ils sont représentés dans cette figure, on les rapproche les uns des autres, de manière que l'angle *d* du premier touche l'angle *a′* du second, et l'angle *d′* de celui-ci l'angle *a″* du troisième; il est clair qu'en regardant A comme le pôle austral de l'aimant AB, ses courans dans sa face antérieure suivront la direction *ad*, puisque c'est en plaçant l'observateur dans cette direction, le dos tourné à l'axe de l'aimant, que l'extrémité A se trouve à sa droite; les courans du barreau A′B′ devront donc, d'après tout ce que nous avons dit, avoir alors la même direction au point où l'angle *d* est supposé en contact avec l'angle *a′*; ils passeront donc par la face postérieure de ce barreau de *a′* en *d′*, et reviendront par la face antérieure dans la direction *d′a′*, d'où il suit que A′B′ s'aimantera de manière que son pôle boréal sera en A′ à gauche

de l'observateur placé dans ce courant et tournant le dos à l'axe du barreau A'B'; ainsi aimanté, ce barreau communiquera les propriétés magnétiques à A''B'', de manière que leurs courans aient la même direction aux angles a'' et d', par lesquels ils se touchent, les courans du barreau A''B'' iront donc sur sa face antérieure dans la direction $a''d''$, et comme l'extrémité A'' est à la droite de l'observateur placé dans ces courans toujours de la même manière, A'' sera le pôle austral de A''B''.

L'aimant AB qui aurait aimanté A''B'' de manière que le pôle boréal de celui-ci fût en A'', s'il l'avait touché immédiatement par son pôle austral A, l'aimantera donc au contraire de manière que A'' soit un pôle austral du même nom que A, quand ils ne communiqueront que par l'intermède du barreau A'B' dont l'axe est perpendiculaire aux leurs : or, c'est précisément ce qui arrive quand il se forme un point conséquent dans un barreau fortement trempé qui touche le pôle austral d'un aimant par une de ses extrémités. La partie voisine du barreau s'aimante d'abord de manière que cette extrémité est un pôle boréal, comme l'extrémité B de l'aimant AB que nous prendrons pour représenter cette partie du barreau, en représentant l'autre partie du même barreau par A''B''; tant que l'électricité de cette der-

nière partie pourra obéir librement à l'action des courans de AB, on aura le cas où AB étant déjà aimanté, et $A''B''$ ne l'étant point encore, ils se touchent immédiatement, c'est-à-dire que l'aimantation se propagera toujours dans le même sens; mais si la dureté de la trempe s'oppose à cet effet, il arrivera dans le barreau, quoique continu, ce qui arrive à AB et à $A''B''$, quand ils ne communiquent qu'à l'aide du barreau $A'B'$, dont l'axe est perpendiculaire à la direction des leurs; en sorte que les courans de quelques-unes de ses particules tourneront autour d'une normale à sa surface, dans le sens où nous venons de voir que tournent les courans de $A'B'$. Ces courans tendront donc à aimanter le reste du barreau dont nous parlons en sens contraire, comme ceux de $A'B'$ aimantent $A''B''$, de manière que ses pôles soient situés en sens inverse de ceux AB, et il se produira ainsi un point conséquent, conformément à l'expérience que nous nous étions proposé d'expliquer.

§ 90. La théorie se trouve encore confirmée par la manière dont s'aimante un fil d'acier plié en hélice, et soumis à l'action d'un fil parallèle à son axe. Si l'on considère sur chacune des spires du fil d'acier, les deux points P et Q, fig. 70, où la surface cylindrique qu'elles forment est touchée par deux plans passant par CD et tangens à cette

surface, la moitié PMR d'une spire comprise entre ces deux points du côté du conducteur, s'aimantera, comme on le voit dans la figure, de manière que son pôle austral sera en P, et son pôle boréal en Q, tandis que la moitié AMP′ de la même spire, qui est comprise entre les parties Q et P′ du côté opposé au conducteur CD, s'aimantera de manière que son pôle boréal sera en Q, et son pôle austral en P′; en sorte que le long des deux côtés du cylindre où sa surface est touchée par les deux plans dont j'ai parlé tout-à-l'heure, il y aura en P, P′, P″, une suite de points conséquens, ayant les propriétés du pôle austral d'un aimant, et en Q, Q′, Q″, etc., une suite de points conséquens ayant les propriétés d'un pôle boréal, tandis que si le conducteur passait dans l'intérieur de l'hélice de fil d'acier, tous les poins de ce fil devraient être aimantés dans le même sens, sans points conséquens, et avec un pôle austral en A et un pôle boréal en B. En développant des fils d'acier aimantés par les deux procédés, on a trouvé, comme l'indique la théorie, dans le premier cas, une suite de points conséquens, et dans le second, une aimantation toujours dans le même sens.

§ 91. Depuis l'époque des premières découvertes sur les phénomènes électro-dynamiques, on a imaginé plusieurs théories pour rendre compte

des faits à mesure qu'ils étaient connus. Ainsi on a d'abord attribué l'action des conducteurs voltaïques sur les aimans à une espèce d'aimantation transversale acquise par ces conducteurs; mais la découverte du mouvement de rotation continue toujours dans le même sens a forcé de renoncer à cette hypothèse.

Il semble d'abord singulier que les mêmes faits, qui s'opposent absolument à ce qu'on attribue à l'aimantation transversale toutes les propriétés des conducteurs voltaïques, ne s'opposent pas à ce qu'on explique toutes celles des aimans en les regardant comme des assemblages de courans électriques; mais il existe deux causes de cette différence; la première, tirée de la nature même du mouvement. En effet, un mouvement qui se continue toujours dans le même sens, malgré les frottemens et la résistance des milieux, et ce mouvement produit par l'action mutuelle de deux corps qui demeurent constamment dans le même état, est un fait sans exemple dans tout ce que nous savions des propriétés de la matière inorganique; il prouve que l'action qui émane des conducteurs voltaïques ne peut être due à une distribution particulière de certains fluides, en repos dans ces conducteurs, comme le sont les attractions et les répulsions électriques ordinaires. On ne peut attribuer cette action qu'à des fluides en mouvement dans

les conducteurs, qu'ils parcourent en se portant rapidement d'une des extrémités de la pile à l'autre extrémité. En second lieu, si les propriétés des conducteurs voltaïques étaient dues à une aimantation transversale, on devrait nécessairement pouvoir imiter, en employant des aimans convenablement disposés, tous les phénomènes produits par l'action mutuelle de deux conducteurs, ce qui n'a pas lieu à l'égard du mouvement continu toujours dans le même sens, qu'on ne peut obtenir qu'avec deux conducteurs ou avec un conducteur et un aimant; tandis que dans la théorie électrique, les courans qui entourent chaque particule d'un aimant formant des circuits fermés, on ne doit pouvoir remplacer un conducteur voltaïque par un ou plusieurs aimans qu'à l'égard des phénomènes que le conducteur produit également, soit qu'il forme ou non un circuit fermé. Or, quand on obtient le mouvement continu par l'action mutuelle de deux conducteurs, il faut nécessairement que l'un des deux ne forme pas un circuit fermé; d'où il suit qu'on peut encore obtenir, comme M. Faraday l'a fait le premier, ce singulier mouvement, en employant un aimant à la place de l'autre conducteur, mais jamais en remplaçant les deux conducteurs par des aimans. Enfin l'action mutuelle des aimans ne donne naissance qu'à des forces dirigées vers des

centres fixes, et on sait qu'il est impossible d'obtenir le mouvement perpétuel avec un nombre quelconque de forces dirigées vers des centres, et dont les intensités sont des fonctions quelconques de la seule distance.

D'autres physiciens, en considérant toujours la cause des phénomènes magnétiques comme entièrement distincte de l'électricité, ont expliqué l'action mutuelle des conducteurs et des aimans, en admettant que chaque pôle, soit austral, soit boréal, d'un aimant ou d'une particule aimantée, exerce sur un courant électrique une force constamment perpendiculaire au rayon vecteur, et que les attractions ou répulsions apparentes résultent de la combinaison des forces révolutives des deux pôles, comme le mouvement rectiligne d'une lame métallique résulte des mouvemens circulaires des deux cylindres d'un laminoir. Plusieurs motifs me paraissent s'opposer à l'admission de cette ingénieuse théorie; 1°. elle isole complètement les trois parties distinctes des phénomènes électro-dynamiques, et les fait dépendre de forces soumises à des lois différentes. Ainsi, les actions mutuelles de deux hélices électro-dynamiques seront les résultantes de forces qui s'exercent suivant la ligne qui joint deux points des corps soumis à l'expérience, et qui sont fonction de la distance et des angles; les attractions et répulsions des

aimans dépendront de forces dirigées encore suivant la ligne qui joint les points entre lesquels elles s'exercent, mais qui ne sont plus que des fonctions de la distance; enfin, l'action mutuelle des hélices et des aimans, qui présentent exactement les mêmes phénomènes, sera le résultat de forces révolutives. 2°. L'existence d'une force élémentaire perpendiculaire à la ligne qui joint les deux points avec lesquels elle s'exerce, n'est appuyée sur aucune analogie, et ne pourrait être admise qu'autant que les phénomènes y conduiraient d'une manière nécessaire. Or, tel n'est pas l'état des choses, puisque la théorie des courans particulaires donne le moyen de représenter les phénomènes connus jusqu'à ce jour, comme autant de résultats d'une force unique, dirigée comme toutes les forces accélératrices que l'on a observées dans la ligne qui joint les deux points entre lesquels elle s'exerce; 3°. quoique ces théories conduisent aux mêmes résultats quand on ne considère que l'action d'un aimant sur un courant rectiligne d'une longueur un peu considérable, celle des forces révolutives est beaucoup moins avancée sous le rapport mathématique, que la théorie des courans particulaires; en effet, cette dernière donne la mesure exacte des actions d'un aimant sur un autre aimant, sur un courant et sur un cylindre électro-dynamique; elle rend égale-

ment compte de la nullité d'action entre un conducteur ou un aimant de forme quelconque et l'anneau magnétique de MM. Gay-Lussac et Welter, tandis qu'il est encore douteux que par des forces révolutives, on puisse représenter numériquement les mêmes résultats ; 4°. si la cause des phénomènes magnétiques est entièrement distincte des courans électriques, il me semble difficile d'expliquer toutes les circonstances de l'aimantation de l'acier, et surtout la formation fréquente des points conséquens dans un fil d'acier perpendiculaire à une spirale électrique, phénomène dont j'ai rendu compte dans le § 88.

§ 92. Il existe entre la manière d'agir d'un aimant et d'un cylindre électro-dynamique une différence ; elle consiste en ce que les pôles du premier sont situés plus près du milieu de l'aimant que ses extrémités, tandis que les points qui présentent les mêmes propriétés dans l'hélice sont exactement placés à ses extrémités.

On peut expliquer cette position des pôles d'un aimant, en supposant que l'intensité des courans va en diminuant depuis le milieu jusqu'aux extrémités. Le même phénomène s'observera encore si les courans ne sont pas tous situés dans des plans perpendiculaires à l'axe de l'aimant, mais inclinés diversement, selon leur position dans le barreau. Pour nous faire une idée nette de la po-

sition des courans, supposons qu'une cause énergique les ait rendus tous parallèles, et qu'ensuite on les abandonne à eux-mêmes; alors l'action mutuelle de deux courans voisins tendra à les amener dans une position telle, que leur direction soit la même dans les parties les plus rapprochées. La fig. 68 représente la position d'équilibre de quatre de ces courans; il est évident que si un élément quelconque, situé à l'extérieur, est attiré par A, il sera repoussé par B; attiré par C, repoussé par D, et ainsi de suite dans toute l'étendue du barreau, qui par conséquent ne conservera aucune action à l'extérieur. C'est ce qui arrive à un barreau de fer doux, parce qu'il n'oppose qu'une très faible résistance au déplacement des courans; mais dans l'acier, l'aimantation se conserve après que l'agent extérieur est enlevé; d'où il résulte que l'acier oppose une résistance au changement de direction des particules; cette résistance a été nommée *force coërcitive* dans l'ancienne théorie; on peut lui conserver le même nom dans la nouvelle. Alors les conditions d'équilibre ne sont plus les mêmes; elles n'exigent plus que chaque courant soit tourné de manière à présenter aux courans voisins des directions parallèles, mais seulement que la force qui tend à déplacer chaque courant soit moindre que la force coërcitive de l'acier. Cela posé, représentons

par *abcd* (fig. 69) la section faite dans un aimant, par un plan qui passe par son axe. Soit A l'extrémité de cet aimant qui se dirige vers le nord, et B celle qui se dirige vers le sud; les courans des particules de l'aimant qui se trouvent dans l'axe ne pourront, à cause de la symétrie de la figure, qu'être situés dans des plans perpendiculaires à cet axe, et leurs directions d'après la situation que nous supposons aux pôles de cet aimant, seront dans la partie supérieure de chacune de ces particules, celles qu'indiquent les flèches marquées sur l'axe de A en B. Considérons maintenant les courans électriques des autres particules formant des séries parallèles à AB; il résulte de ce qui précède, que les parties de ces courans les plus éloignées de l'axe tendront, par l'action de ceux de la série AB, et successivement de toutes les séries comprises entre l'axe et celle que l'on considère, à se porter vers le milieu de l'aimant, tandis que les parties des mêmes courans qui se trouvent du côté de l'axe, tendront à être repoussées vers l'extrémité de l'aimant la plus voisine. Les courans électriques des particules des séries latérales devront donc, en vertu de cette action, se disposer dans des plans d'autant plus inclinés à l'axe de l'aimant, qu'elles seront plus éloignées de cet axe et s'écarteront davantage de son milieu; en sorte que ces courans, dans la partie

supérieure de chaque particule, devront prendre la direction marquée par les flèches de la figure dans toutes la masse de l'aimant. Alors les pôles devront se rapprocher du milieu de l'aimant d'une partie de sa longueur, d'autant plus grande, que les plans d'un plus grand nombre de courans seront ainsi inclinés, et qu'ils le seront davantage, c'est-à-dire d'autant plus que l'aimant sera plus épais relativement à sa longueur, ce qui est conforme à l'expérience. Si la largeur de l'aimant devenait très grande, il arriverait un point où les forces qui tendent à produire l'inclinaison des courans l'emporteraient sur la force coërcitive, et alors l'aimantation ne pourrait plus subsister. On sait en effet qu'il est très difficile d'aimanter un barreau de manière que ses pôles soient dans le sens de sa plus petite dimension, et que si on parvient à lui donner cette aimantation par quelque agent très énergique, il la perd presque aussitôt que l'on fait cesser l'influence de l'agent. Si les courans électriques de toutes les particules sont constamment situés dans des plans parallèles, et que l'aimantation ne soit autre chose que la production et l'accroissement d'énergie des courans, alors les courans du milieu de l'aimant seront maintenus par l'influence des couraus voisins des deux côtés; il en sera de même sur la plus grande partie de la longueur du barreau; mais

vers les deux extrémités, chaque courant particulaire ne sera plus influencé que par des courans situés d'un seul côté, d'où il résulte que les particules extrêmes devront conserver une intensité moindre et qui ira en décroissant rapidement vers les deux bouts. Telle serait dans ce cas la cause qui rapprocherait les pôles des aimans de leur centre.

SUPPLÉMENT.

§93. Dans tout le cours de cet Ouvrage, j'ai expliqué la manière de faire les expériences avec l'appareil (fig. 1), destiné à l'enseignement dans les colléges royaux. Je joindrai ici la description d'un autre instrument plus complet, surtout pour les travaux de recherches, et qui sert aux démonstrations dans les cours du Collége de France. Cet appareil est représenté pl. V; il est composé de plusieurs systèmes de conducteurs fixes terminés par des coupes dans lesquelles on suspend les conducteurs mobiles qui servent aux diverses expériences. Le premier système de conducteurs fixes consiste dans les trois colonnes verticales en cuivre XHL, X'H'L'K, X''H''u. Les deux premières communiquent par les lames flexibles L et L' avec les deux conducteurs mnx, $m'n'x'$, terminés par les coupes m, n, x, m', n', x'. La lame L peut communiquer à volonté dans les coupes n ou n', et la lame L' avec les coupes m ou m' : dans les deux coupes inférieures x et x' on suspend la plus grande partie des appareils à deux pointes, comme ceux des figures 15, 16, 21, 24,

38, 39, 40, etc. On change la direction des courans dans tous ces conducteurs mobiles en passant la lame L de n en n' et la lame L′ de m en m', ou réciproquement. Dans la position dessinée sur la figure, le courant entrerait par XLnx, passerait de x en x' en suivant le conducteur mobile, puis reviendrait se fermer en X′ par $x'n'$L′H′X′. Quand on veut soumettre les appareils mobiles à l'action d'un courant vertical, on réunit les deux coupes u et v par un fil de cuivre et l'on établit la communication dans l'ordre ZV$vuznx \ldots x'm'$HX′. Pour l'égalité d'action entre un conducteur rectiligne et un conducteur mobile, la marche du courant est ZVvuL$nx \ldots x'm'$L′H′X′Z′$v'u'$H′X″. La communication entre X′ et Z′ s'établit par un fil de cuivre que l'on courbe d'une manière convenable : ZVv et Z′V′v' sont deux lames de cuivre clouées sur deux règles en bois qui font saillie sur le reste de la table.

Quand les appareils mobiles suspendus dans les coupes x' et x doivent recevoir l'influence d'un courant horizontal, ce courant est produit dans une lame de cuivre qui forme sur la table plusieurs parallélogrammes, de manière que les douze côtés parallèles $\beta\alpha$, $\delta\varepsilon$, $\iota\kappa$, etc., sont parcourus dans le même sens et par suite exercent tous des actions du même genre sur le conducteur mobile. A cet effet, on plonge le rhéophore positif dans A,

la lame flexible C dans B, le courant parcourt d'abord le parallélogramme $B\alpha\beta\gamma\delta$, puis dans le même ordre les cinq autres parallélogrammes renfermés dans le premier. Il arrive ainsi en η, de là passant sous la table il ressort au point θ et suit les figures de l'autre côté, de manière que sa direction dans les parties situées vers le milieu de la table est $\iota\varkappa$. Après avoir tracé tout le circuit jusqu'à λ, l'électricité vient par le prolongement $\lambda\mu\nu$ atteindre la coupe X′ d'où elle remonte dans les conducteurs mobiles, comme je l'ai expliqué précédemment.

A gauche de la table se trouve un vase de cuivre formé par deux parois parallèles PQ, *pq*, et traversé par une tige métallique T*t*, qui sert d'abord à suspendre les appareils d'une seule pointe comme ceux des figures 10, 12, 13, 19, etc. L'influence est amenée à ce vase de la coupe A, en plongeant la lame flexible C dans E. On peut à volonté l'amener directement au vase en faisant communiquer par un fil de cuivre une des coupes e', e, e'' avec une des coupes g, l, et l'; on établit cette communication à l'aide de la spirale, (fig. 18) qui sera parcourue dans un sens lorsque ses deux appendices plongeront dans les coupes e et l', et en sens contraire quand on les transportera dans les deux coupes inverses e' et l. Pour fermer le circuit et enlever l'électricité du

vase, on peut se servir d'abord de la lame *ph* qui communique avec la coupe A d'une part, et de l'autre avec le ressort TRπ; et en second lieu, de la tige SS′ qui permet de suspendre dans *t* des appareils presque fermés, en les terminant à l'une de leurs extrémités par une pointe qui s'appuie sur *t*, et à l'autre, par une coupe qui reçoit la pointe S′; le circuit dans ce cas se ferme par la colonne centrale L″KH′X′, qui est soutenue au point K par un tube de verre MN. On peut encore sur la tige T*t*, disposer des appareils qui se terminent dans une même verticale par deux pointes dont la distance est arbitraire. Il suffit d'appuyer une de ses pointes dans la coupe *t*, et l'autre dans la coupe annulaire *g*′ séparée de la tige T*t* par un tube de verre $o\pi$. Le ressort RR permet d'élever ou d'abaisser la coupe *t* de manière à régler la hauteur de cette coupe sur les dimensions des divers conducteurs que l'on y adapte.

Les appareils qui doivent tourner dans tous les azimuths, se suspendent dans les deux coupes χ et ω dont la première communique par la coupe φ et la lame de cuivre L‴ avec la colonne centrale KH′X′, et la seconde par la coupe χ avec la colonne HX. Les tiges recourbées qui forment les deux branches de ce système sont séparées l'une de l'autre par un corps isolant.

A droite de l'appareil se trouve un système

de conducteurs fixes destiné à imiter l'action directrice de la terre sur les courbes fermées. Il se compose de deux montans en bois ΓΔ et Γ′Δ′; le premier est revêtu sur ses deux faces antérieure et postérieure par deux lames métalliques $Z'z$ et $Z''z'$ qui transportent l'influence électrique dans deux auges demi-circulaires z et z'. Sur les deux montans se fixe une spirale comme celle de la fig. 18, dont les deux appendices sont remplacées par des roues en cuivre que l'on fait plonger dans les deux auges z et z'. A l'extrémité de la spirale diamétralement opposée, est attaché un axe qui sert à maintenir l'appareil sous une inclinaison quelconque à l'aide de la vis de pression Ξ. Au-dessus de cette spirale on suspend dans les coupes y et y' le conducteur astatique (fig. 23); on peut encore soumettre à son action l'appareil (fig. 24) en le suspendant dans les coupes x et x'.

Une dernière partie de l'appareil pl. V est destiné aux attractions et répulsions des courans angulaires; elle se compose des coupes ΛΩΠΦ, toutes appuyées sur la table, et de la coupe Υ soudée à la tige $\varkappa\chi\varphi$ et communiquant à la colonne centrale. On met le deux pointes z et l du conducteur (fig. 3) dans les coupes Υ et Φ, le réophore positif dans A et le rhéophore négatif dans X′, la marche du courant est ΑΛΘΩΨΦlazL‴X′; dans $l\alpha$ il s'éloigne du sommet de l'angle et s'en approche

dans la partie horizontale du conducteur ΛΘ, ce qui donne la répulsion des courans angulaires : pour obtenir l'attraction, on transporte les deux lames mobiles dans les coupes Π et Λ, et la marche du courant devient ΑΛΘΠΨΦlazΥL‴X′, le courant dans la s'éloigne du sommet de l'angle, et il en est de même dans la partie horizontale du courant ΠΘ.

§ 94. La description du multiplicateur électro-dynamique n'ayant été connue en France qu'au moment où l'impression de cet Ouvrage était déjà fort avancée, je n'ai pu parler de cet instrument à la place qui lui convenait, après la déviation de l'aiguille aimantée par un courant électrique. J'insérerai ici la description que M. Oersted vient de donner dans les Annales de Physique et de Chimie, tome XXII, pages 358 et suivantes. Immédiatement après la découverte de l'électro-dynamique, M. Schweigger, professeur à Halle, inventa un appareil très propre à mettre en évidence, au moyen de l'aiguille aimantée, les courans électriques les plus faibles. L'effet de ce multiplicateur est fondé sur l'action égale qu'exercent sur l'aiguille aimantée toutes les parties d'un fil conducteur, lorsqu'il transmet un courant. Quand une partie de ce fil est courbe, comme l'est *abc* (fig 71), si les deux branches *ab* et *bc* se trouvent dans un plan

vertical, et qu'une aiguille aimantée soit convenablement suspendue dans le même plan, on conçoit facilement que l'aiguille doit recevoir une impulsion double de celle qu'une seule de ses branches lui aurait imprimée. En effet, les impulsions données à l'aiguille, par les deux portions horizontales du fil, s'ajoutent entre elles : il suffit, pour s'en convaincre, de remarquer que, dans la disposition actuelle, ces portions sont parcourues par le courant électrique en deux sens différens. Le fil supérieur et le fil inférieur ne dévient l'aiguille des deux côtés opposés que dans le cas où l'électricité s'y meut dans la même direction ; on augmentera donc encore l'effet quand on fera faire au fil conducteur plusieurs circonvolutions autour de l'aiguille, comme on le voit dans la figure 72 ; c'est là ce qui constitue le multiplicateur électro-magnétique. La figure 73 représente cet appareil d'après la forme que lui a donnée M. Oersted, laquelle ne diffère de celle de M. Schweigger que par des parties peu essentielles. AA est le pied de l'instrument ; CC, CC sont deux montans qui portent un châssis BB, dans le bord duquel existe une rainure où se logent les tours successifs du multiplicateur. DD est un montant destiné à porter le fil auquel l'aimant doit être suspendu. Toutes ces parties sont en bois. EE est un fil de métal qui passe

à frottement par un trou pratiqué dans la partie supérieure du montant DD. A ce fil métallique s'attache par un peu de cire le fil de cocon EF; celui-ci porte à son extrémité un petit triangle double de papier, sur lequel repose la petite aiguille aimantée. En G est un cylindre creux, dans lequel passe librement le fil de suspension, et qui empêche le fil du multiplicateur de le toucher.

On voit encore, au-dessous de l'aiguille aimantée, un cercle divisé pour mesurer les déviations. Le fil multiplicateur est de cuivre argenté; son épaisseur est d'un quart de millimètre. *Il est enveloppé dans toute sa longueur de fil de soie ;* par là on empêche toute communication électrique entre les différentes parties de ce fil qui sont superposées dans la rainure du châssis BB. H et J représentent les deux extrémités du fil.

L'usage de cet appareil se conçoit presque sans explication. Pour multiplier l'effet qu'a sur l'aiguille un arrangement galvanique, on n'a qu'à établir les communications de manière que le fil du multiplicateur devienne une partie du circuit. L'électricité développée par le contact de deux disques, l'un de zinc et l'autre de cuivre, quand même on n'emploie que de l'eau pure pour conducteur liquide, est déjà très appréciable avec cet appareil. On peut de la même manière rendre sensibles des actions galvaniques qui seraient trop

faibles pour être aperçues en se servant d'une grenouille préparée.

Quand on veut mettre en évidence une action extrêmement faible qui donne une déviation à peine visible, il faut ouvrir le circuit immédiatement après l'avoir fermé, et le fermer ensuite de nouveau chaque fois que l'aiguille est sur le point de terminer le retour de l'oscillation précédente. On peut encore rendre l'appareil plus délicat en plaçant en HH une petite aiguille aimantée dans la situation nécessaire pour diminuer la force avec laquelle l'aiguille suspendue tend à conserver sa direction.

Lorsqu'on veut se servir du multiplicateur pour des actions électro-dynamiques un peu considérables, il faut avoir des fils conducteurs un peu plus épais. Sans cette précaution, au lieu d'augmentation, on pourrait avoir diminution de l'effet, causée par l'imperfection du conducteur. M. Avogadro a trouvé, par les indications du multiplicateur, que quelques métaux donnent, à l'instant qu'on les plonge dans l'acide nitrique concentré, un effet contraire à celui qui se manifeste quelques momens après : ce changement n'a pas lieu dans l'acide nitrique délayé. Les couples métalliques qui ont fait voir cette propriété sont :

Plomb et bismuth,
Plomb et étain,

Fer et bismuth,
Cobalt et antimoine.

M. Avogadro dit que l'effet qui a lieu à l'instant de l'immersion des métaux dans l'acide concentré, est le même que celui qu'on obtient dans l'acide délayé, et que c'est seulement à la longue que l'effet contraire se manifeste. Il est à remarquer que l'acide nitrique concentré attaque beaucoup plus fortement le bismuth que le plomb, et qu'au contraire l'acide délayé attaque très fortement le plomb et presque pas le bismuth.

§ 95. Si l'on plonge à deux instans différens deux morceaux d'un même métal ou les deux bouts d'un même morceau dans un acide capable de les attaquer, celui des deux qui aura été plongé le premier se comportera envers l'autre comme le métal le plus positif. L'expérience se fait surtout très bien avec deux lames de zinc et de l'acide sulfurique ou hydro-chlorique délayé. Elle réussit encore avec un fil de cuivre dont les deux extrémités sont pliées en spirales pour présenter plus de surface. Ce fait remarquable est le premier exemple d'un courant produit avec un seul métal; M. Becquerel est parvenu à établir un courant dans un seul métal pur sans l'intermédiaire d'aucun liquide. Son procédé consiste à chauffer au rouge une des extrémités d'un fil de cuivre, et à la presser contre l'extrémité opposée; à l'instant il

s'établit un courant, la partie chauffée agissant comme le métal électro-positif. On obtient le même résultat en chauffant une partie quelconque d'un fil de platine formant un circuit fermé, et touchant ensuite avec un corps froid une partie du fil voisine du point échauffé. M. Cumming a aussi découvert le fait de la production d'un courant par l'action de la chaleur sur un circuit d'un seul métal; mais ces expériences, insérées dans le Journal scientifique *Annals of Philosophy, june* 1823, n'ont été connues à Paris que plus de trois semaines après que M. Becquerel avait communiqué les siennes au Bureau des Longitudes. M. Becquerel a produit encore un courant très énergique par l'action des acides sur les alcalis. A cet effet, il a mis une goutte de dissolution de potasse dans une petite coupe de platine, et il a appuyé sur la coupe une lame de platine plongée préalablement dans un acide. A l'instant du contact, l'aiguille d'un multiplicateur qui réunissait les deux morceaux de platine, a été fortement déviée.

§ 76. Quelques physiciens, partisans de la théorie de l'aimantation transversale, ont tenté de la rendre calculable par une hypothèse sur la position des pôles; elle consiste à considérer les conducteurs électriques, comme des piles d'aimans qui se croiseraient à angles droits et dont tous les pôles occuperaient quatre lignes paral-

lèles à l'axe du cylindre et diamétralement opposées l'une à l'autre. La réfutation de cette théorie se trouve déjà dans l'impossibilité de produire un mouvement perpétuel avec une combinaison quelconque d'aimans ; en outre, on peut prouver que même les expériences qui s'expliqueraient par des combinaisons d'aimans, ne peuvent s'accorder avec la disposition précédente. A cet effet, M. Oersted a arrangé un circuit CEGFD (fig. 74) dans la forme d'un carré de 10 pieds de côté ; l'un des côtés verticaux CD était fixé sur la colonne AB qui avait un support I, sur lequel était placé l'aiguille aimantée. L'autre côté vertical contenait l'appareil galvanique, composé d'une caisse de cuivre G et d'une plaque de zinc H. Les deux parties horizontales et la branche verticale EF étaient trop éloignées pour agir sur l'aiguille dont la déviation était entièrement due à CD ; l'auteur de l'expérience a reconnu que dans toutes les positions l'action de ce fil sur l'aiguille aimantée était identiquement la même, d'où il résulte que toutes les faces du fil sont parfaitement semblables ; ce qui est en opposition directe avec l'hypothèse proposée.

Nota. Tous les instrumens décrits dans ce Traité, se trouvent chez M. Pixii, neveu et successeur de Dumotiez, ingénieur en instrumens, rue du Jardinet, n° 2, quartier de l'école de Médecine.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS CE VOLUME.

DEUXIÈME PARTIE.

Pages.

TROISIÈME PARTIE.

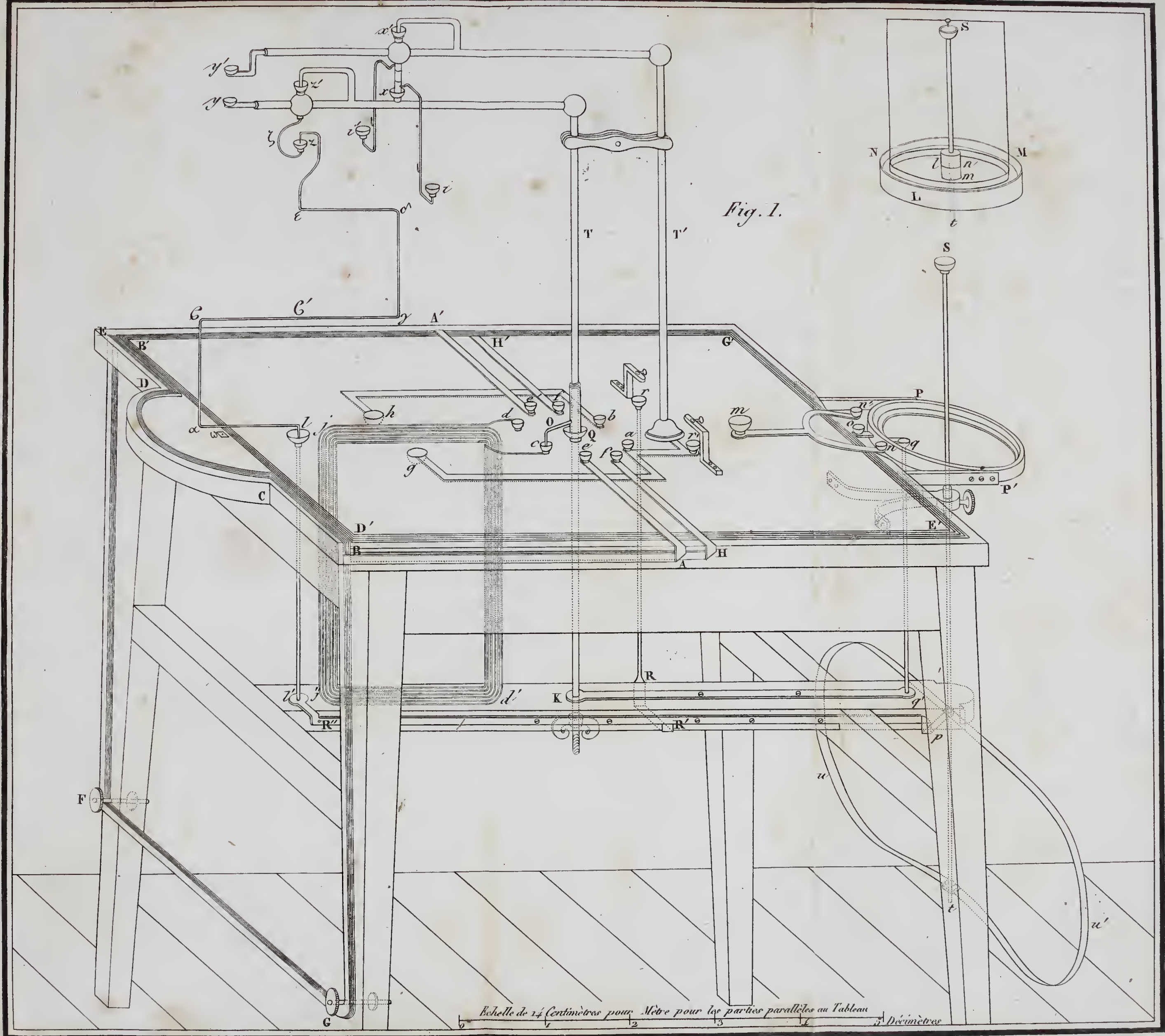
SUPPLÉMENT.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

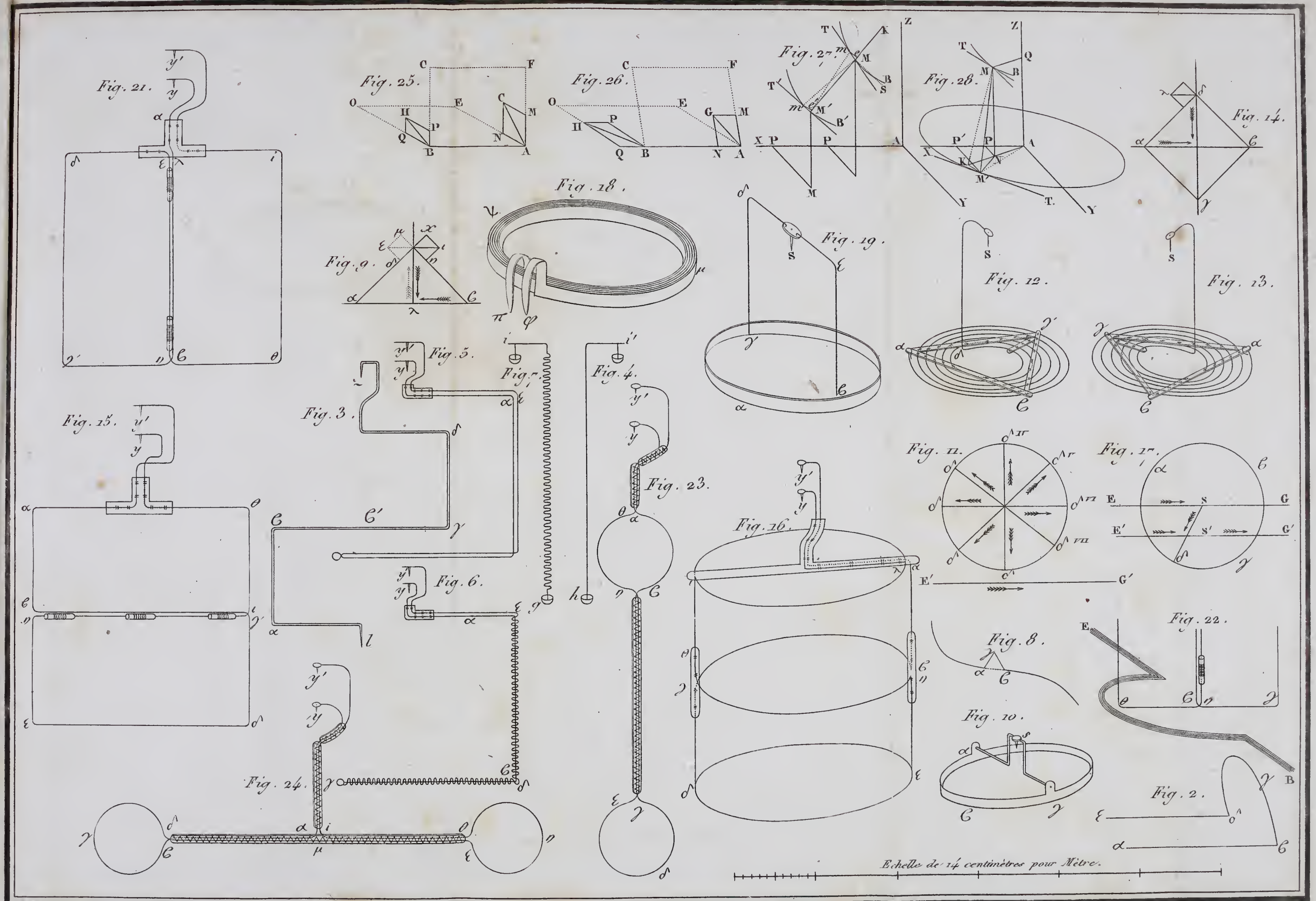
Fautes essentielles à corriger.

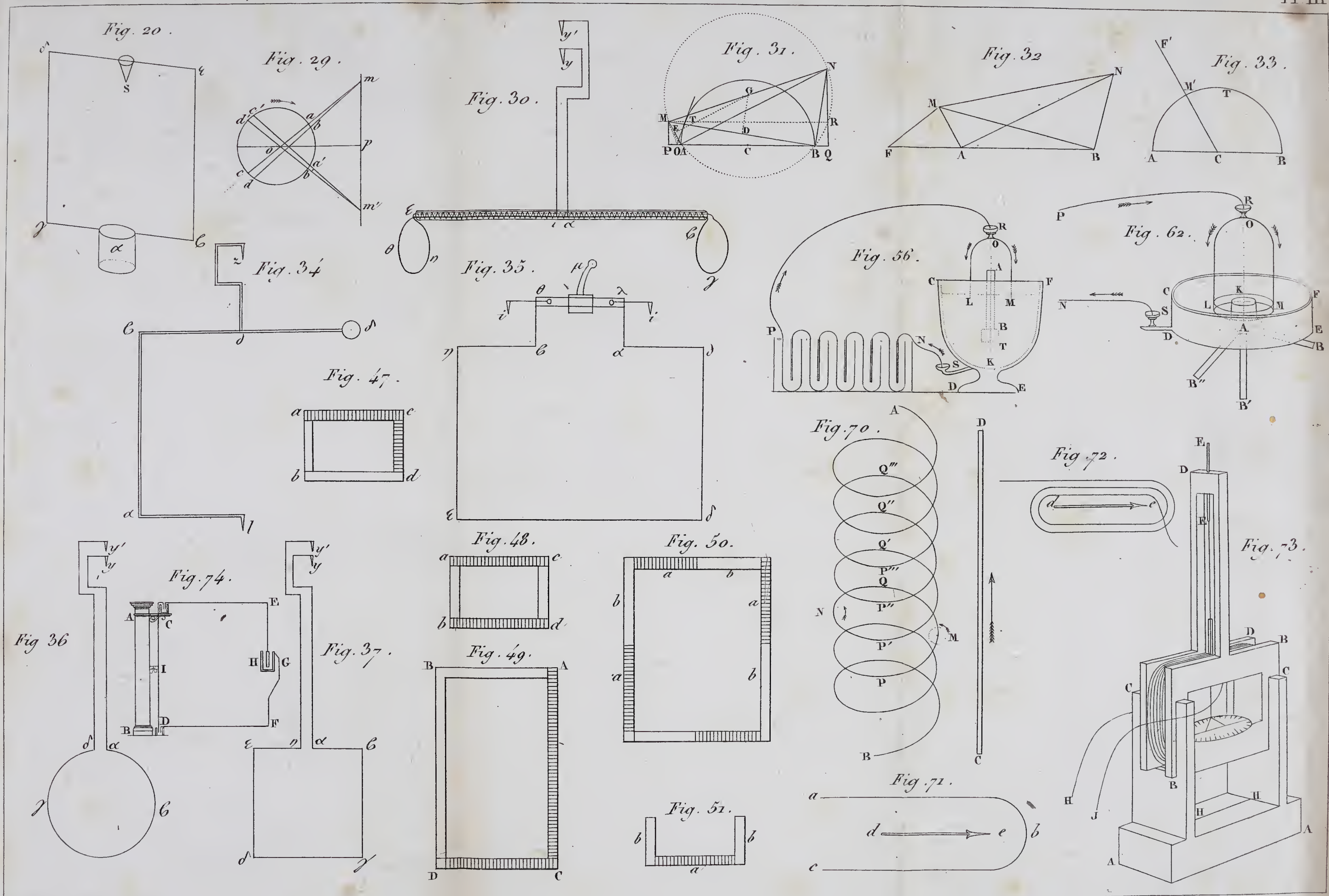
Page 13,	ligne 24,	$AB'C'D'$, *lisez* $A'B'D'$
15,	9,	z', *lisez* z
16,	24,	i, *lisez* i'
24,	18,	$L'M'N'$, *lisez* lmn (fig. 1)
id.	20,	s'éloignant, *lisez* se rapprochant
id.	22,	se rapprochant, *lisez* s'en éloignant
28,	8,	avançant, *lisez* rétrogradant
id.	*id.*	LMN, *lisez* $\alpha\beta\gamma\delta$ ou LMN
id.	13, 14 et 15,	en rétrogradant, mais... le sens LMN, *lisez* dans la direction de ce courant, et par conséquent le mouvement de rotation a encore lieu dans le sens $\alpha\beta\gamma\delta$ ou LMN
31,	3,	inférieure, *lisez* inférieur
id.	4,	$\varepsilon\theta$, arrive en $\varkappa$, *lisez* $\varepsilon\varkappa$, passe
id.	5,	θ en $\varkappa$ suit $\varkappa c$, *lisez* $\varkappa$ en θ, suit $\theta\iota$
id.	27,	δ, *lisez* S
32,	4,	δ, *lisez* S
38,	19,	constamment, *lisez* l'instrument
id.	22,	H'', *lisez* H
40,	7,	*effacez* or
58,	4, en remont.	$AN = r$, *lisez* $AN = u$
id.	3, en remont.	XAM, *lisez* XAM'
id.	2, en remont.	MN'^2, *lisez* $M'N^2$
id.	dernière	le point u, *lisez* le point M'
60,	3,	or, d'après l'expérience qui, *lisez* l'expérience
id.	11,	$u = o$, *lisez* $u = o$
id.	21,	telle est, *lisez* telle est donc
62,	6,	descendra, *lisez* deviendra
63,	8,	i, h, *lisez* i', h
id.	10,	hi, *lisez* hi'
id.	23,	gh, *lisez* ii'
67,	20,	après le mot assemblage, *effacez* la virgule.
70,	2 et 8,	*ajoutez*... (S.)
71,		§ 34. La figure de ce paragraphe est incomplète dans un certain nombre d'exemplaires; pour y suppléer, il faut, sur la figure 31, faire passer un cercle par les points M, A, B, N, nommez G le centre de ce cercle, E le milieu de AM et D le milieu de BM. Le point G est situé sur MN.
74,	16,	*après* MP, NQ, *ajoutez* (fig. 31)
79,	8,	M', *lisez* M' (fig. 33)
id.	*id.*	$AT'B$, *lisez* ATB
id.	11,	*effacez* (fig. 33)
92,	11,	$\gamma\iota$, *lisez* $\gamma\delta$
94,	23,	$\gamma'\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\varkappa$, *lisez* $\gamma'\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\varkappa$
95,	6,	dircetion, *lisez* direction
id.	14,	cerle, *lisez* cercle
147,	20,	Dans la figure 58, mettez aux points de rencontre du cercle A et des

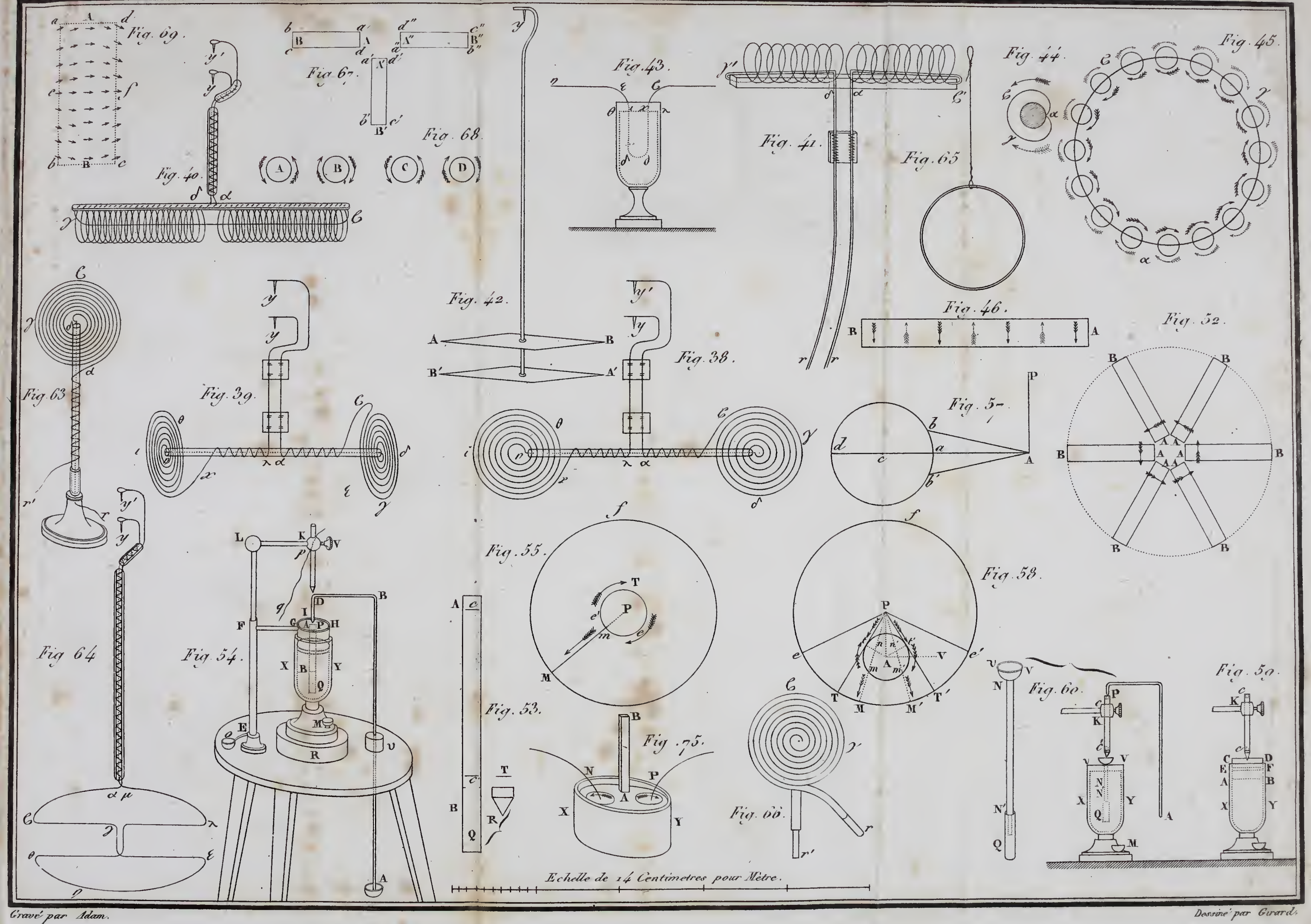
		lignes PT, PM, etc., les petites lettres $tmm't'n'n$, en suivant l'ordre dans lequel ces lettres se suivent dans le texte, et sur la perpendiculaire à PA la lettre V, dans les exemplaires où ces lettres manquent.
Page 153,	ligne 10,	(fig. 55), *lisez* (fig. 75, pl. IV), cette figure est mal à propos marquée (fig. 56), dans un certain nombre d'exemplaires.
id.	18,	*effacez* mais
155,	2,	(fig. 56), *lisez* (fig. 56, pl. III). Dans un certain nombre d'exemplaires, cette figure est mal à propos marquée fig. 67, et la lettre O y a été oubliée par le graveur.
163,	1,	sylindre, *lisez* cylindre
id.	17,	1812, *lisez* 1822
166,	15,	sur, *lisez* autour d'.....
173,	22,	que la spirale, *lisez* que dans la spirale
186,	9,	après fig. 67, *ajoutez* pl. IV
189,	1,	PMR, *lisez* PMQ
id.	5,	AMP', *lisez* QNP'

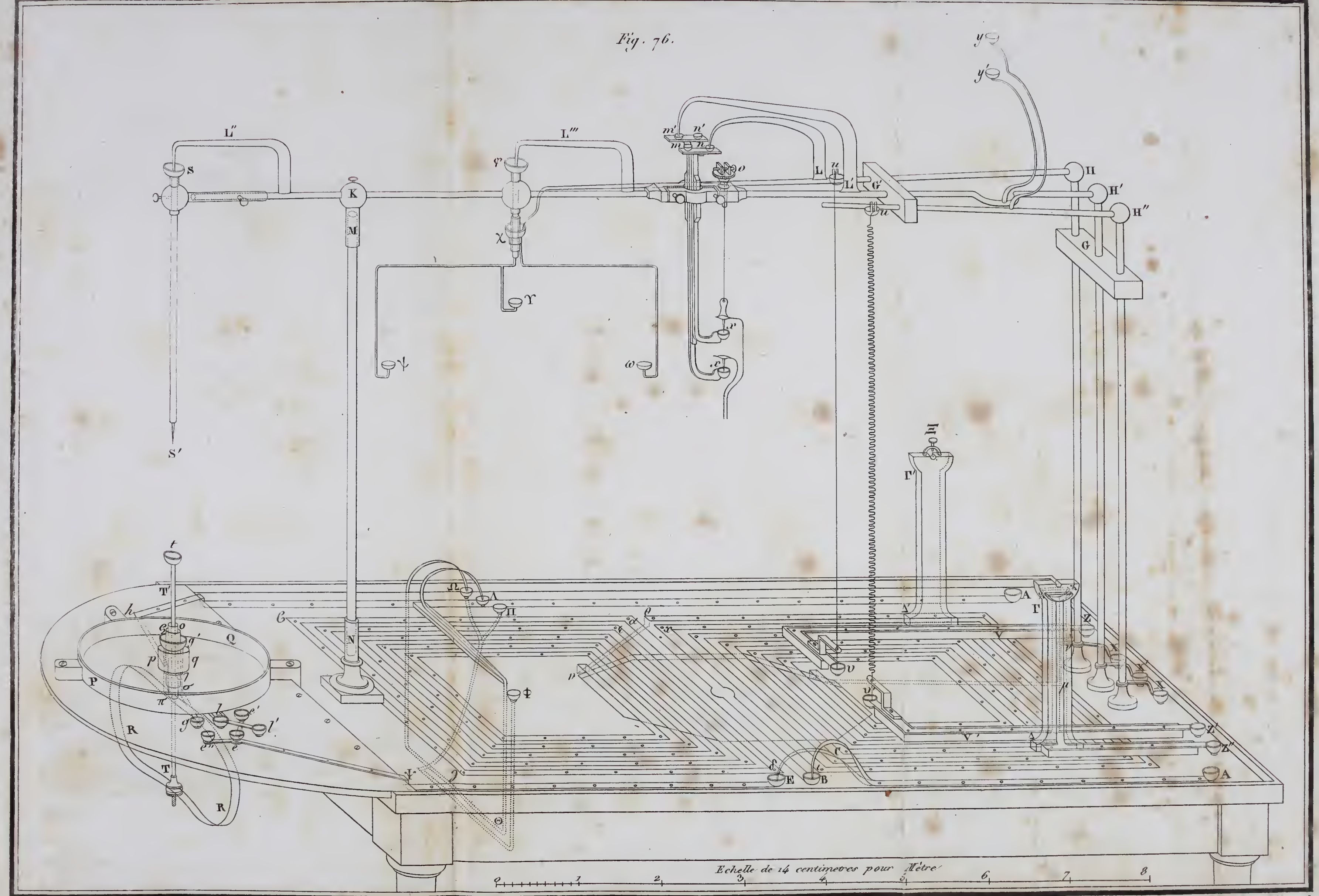


Gravé par Adam. *Dessiné par Girard.*


Fig. 21.
Fig. 25.
Fig. 26.
Fig. 27.
Fig. 28.
Fig. 14.
Fig. 18.
Fig. 9.
Fig. 19.
Fig. 12.
Fig. 13.
Fig. 5.
Fig. 7.
Fig. 4.
Fig. 3.
Fig. 15.
Fig. 23.
Fig. 11.
Fig. 17.
Fig. 16.
Fig. 6.
Fig. 8.
Fig. 22.
Fig. 10.
Fig. 24.
Fig. 2.
Echelle de 14 centimètres pour Mètre.


Fig. 20.
Fig. 29.
Fig. 30.
Fig. 31.
Fig. 32
Fig. 33.
Fig. 34.
Fig. 35.
Fig. 47.
Fig. 56.
Fig. 62.
Fig. 70.
Fig. 72.
Fig. 73.
Fig. 36
Fig. 74.
Fig. 37.
Fig. 48.
Fig. 49.
Fig. 50.
Fig. 51.
Fig. 71.


Fig. 69.
Fig. 67.
Fig. 68.
Fig. 40.
Fig. 43.
Fig. 41.
Fig. 65.
Fig. 44.
Fig. 45.
Fig. 63
Fig. 39.
Fig. 42.
Fig. 38.
Fig. 46.
Fig. 52.
Fig. 57.
Fig 64
Fig. 54.
Fig. 55.
Fig. 58.
Fig. 53.
Fig. 75.
Fig. 66.
Fig. 60.
Fig. 59.
Echelle de 14 Centimetres pour Mètre.



Gravé par Adam

Dessiné par Girard

